



Carolina Pereira Gomes
Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

Avaliação dos Custos de Ciclo de Vida de Vãos Envidraçados

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Professor Doutor Daniel Aelenei, Professor
Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa

Presidente: Prof. Doutor João C. G. R. Almeida
Arguente: Prof. Doutor Ricardo F. M. Mateus
Vogal: Prof. Doutor Daniel Aelenei



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março de 2017

“Copyright” Carolina Pereira Gomes, Faculdade de Ciências e Tecnologia e Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

A presente dissertação, inserida no âmbito de Mestrado Integrado de Engenharia Civil – Perfil de Construção, da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Lisboa, resulta do trabalho, esforço, dedicação e, principalmente do apoio de algumas pessoas as quais não poderia deixar de agradecer.

Gostaria de agradecer primeiramente à minha família, em especial aos meus pais e irmão, que sempre estiveram do meu lado e me apoiaram não só na realização deste trabalho, como ao longo de todo o meu percurso académico motivando-me para dar sempre mais.

Ao meu orientador Professor Doutor Daniel Aelenei, por toda a disponibilidade, auxílio, paciência e confiança depositada em mim para o desenvolvimento deste tema.

Aos meus amigos, um enorme obrigada pela força e motivação passada bem como a disponibilidade para ajudar sempre que necessário.

Por fim, gostaria de agradecer a todos os docentes que me instruíram e à instituição de ensino FCT-UNL, que me transmitiram todo o conhecimento essencial para o completar da minha formação.

Resumo

Com a evolução do ser humano é inerente que as suas necessidades sejam alteradas assim, todo o seu meio envolvente terá de ser adaptado a novas exigências. Esta característica de constante mudança leva a que no âmbito da construção os requerimentos existentes estejam em constante estudo e adaptação.

Na presente crise económica, principalmente no sector da construção é imperativo que as soluções construtivas aplicadas a edifícios garantam uma maior sustentabilidade e durabilidade, cumprindo um maior número de requisitos, procurando um consumo energético menor e um melhor conforto térmico. Assim, torna-se fulcral o estudo de soluções que otimizem o desempenho de edifícios, tendo em consideração o fator económico ao longo da vida útil do edifício.

De forma a atenuar o consumo de energia, a União Europeia publicou a Diretiva de Desempenho Energético de Edifícios em 2010 (EPBD *recast*), onde os estados membros são obrigados, para grandes reabilitações e novos edifícios a uma análise e construção de soluções que obtenham o menor consumo e maior rentabilidade obtendo uma solução de custo ótimo considerando o clima local. A Diretiva tem por objetivo a diminuição do consumo de energia promovendo a eficiência energética e a certificação da solução ótima. As imposições propostas na Diretiva para além de melhorarem o consumo de energia vêm reforçar a utilização de sistemas com fontes de energia renovável diminuindo as emissões de gases com efeito de estufa, melhorando as questões ambientais propostas no Protocolo de Quioto.

A presente dissertação tem como propósito a análise do custo do ciclo de vida de soluções de envidraçado, verificando o impacto que a sua alteração produz numa fração habitacional. Pretende-se através da análise das necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento, dos balanços energéticos e conforto, comparar a solução de custo ótimo com as soluções consideradas. O comportamento energético será analisado com a ferramenta de simulação computacional EnergyPlus.

Palavras-Chave: Análise de Custo de Ciclo de Vida (LCCA), Balanço Energético, EPBD, Soluções Envidraçadas, Energy Plus

Abstract

With the evolution of the human being it's inherent that his needs undergo modifications as such, the whole environment will have to be adapted to new requirements. This characteristic of continuous change leads to constant study and adaptation in the field of construction.

In the present economic crisis, especially in the construction sector, it is imperative that the building solutions applied to buildings guarantee greater sustainability and durability by fulfilling a greater number of requirements, seeking a lower energy consumption and better thermal comfort. In this way, the study of solutions that optimize the performance of buildings, considering mainly their durability, energy consumption, thermal comfort and economic factor, it's essential, considering not only the construction period, but throughout the useful life of the building.

To mitigate energy consumption, the European Union has published the Energy Performance in Buildings Directive (EPBD recast) in 2010, where member states are required for major rehabilitation and new buildings to analyze and construct solutions that will lower consumption and provide greater profitability, considering the local climate obtaining a solution of optimal cost. The Directive aims to reduce energy consumption by promoting energy efficiency and certification of the optimal solution. The Impositions made in the Directive, in addition to improving energy consumption, will strengthen the use of renewable energy sources by reducing greenhouse gas emissions by reducing the environmental issues proposed in the Kyoto Protocol.

The purpose of this dissertation is to analyze the life cycle cost of glazing solutions, verifying the impact that their alteration produces on a housing fraction. The heating and cooling energy needs, the energy balances and habitational comfort, will be used to compare the optimal cost solution with the solutions considered. The energy behavior will be analyzed with the EnergyPlus computational simulation tool, using the REH to define the fundamental parameters.

Keyword's: Life Cycle Cost analysis (LCCA), Energy Balance, EPBD, Glazing Solutions, Energy Plus, REH

Índice

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 ENQUADRAMENTO DO TEMA..... | 1 |
| 1.2 MOTIVAÇÕES | 2 |
| 1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO | 3 |
| 1.4 ORGANIZAÇÃO ESTRUTURAL DO TRABALHO..... | 3 |
| 2 ESTADO DO CONHECIMENTO | 5 |
| 2.1 VÃOS ENVIDRAÇADOS..... | 5 |
| 2.1.1 Enquadramento Histórico | 5 |
| 2.1.2 Tipologias de Janelas..... | 7 |
| 2.1.3 Sistemas de Janelas..... | 8 |
| Caixilhos | 9 |
| Vidros | 9 |
| Câmara de Preenchimento | 11 |
| Sombreamento | 12 |
| 2.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR | 12 |
| 2.2.1 Condução..... | 13 |
| 2.2.2 Convecção | 14 |
| 2.2.3 Radiação..... | 14 |
| Radiação de um Corpo Negro | 16 |
| Características das superfícies | 16 |
| 2.3 DESEMPENHO DO VIDRO | 17 |
| 2.3.1 Coeficiente de Transmissão Térmica - U | 17 |
| 2.3.2 Fator Solar– g_L | 18 |
| 2.3.3 Transmissão Luminosa– Tv | 19 |
| 2.4 ENERGYPLUS | 19 |
| 2.4.1 Conforto térmico segundo ASHRAE..... | 21 |
| 2.5 ANÁLISE DO CUSTO DE CICLO DE VIDA..... | 22 |
| 3 METODOLOGIA | 25 |
| 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA FRAÇÃO | 25 |
| 3.2 ZONAS TÉRMICAS | 26 |
| 3.3 CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA..... | 28 |
| 3.3.1 Temperatura Exterior | 28 |
| 3.3.2 Temperatura Interior..... | 29 |
| 3.4 SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS – CASO BASE | 29 |
| 3.5 ÁREA ENVIDRAÇADA..... | 31 |
| 3.6 GANHOS INTERNOS..... | 31 |
| 3.6.1 Ocupação | 32 |
| 3.6.2 Iluminação..... | 33 |
| 3.6.3 Equipamentos | 35 |
| 3.7 VENTILAÇÃO..... | 36 |
| 3.7.1 Ventilação por Infiltração..... | 37 |
| 3.7.2 Ventilação entre Zonas..... | 38 |
| 3.8 SOLUÇÕES DE ENVIDRAÇADO | 38 |
| 3.8.1 Solução de Sombreamento | 38 |
| 3.8.2 Solução de Caixilho..... | 39 |
| 3.8.3 Soluções de Vidro Propostas | 40 |
| 3.9 SISTEMA DE HVAC..... | 42 |
| 3.10 PERÍODO DE SIMULAÇÃO | 43 |
| 3.11 ANÁLISE DE CUSTO DE CICLO DE VIDA | 43 |
| 4 RESULTADOS | 45 |
| 4.1 REGIÃO DE LISBOA..... | 45 |

| | |
|--|-----------|
| 4.1.1 Balanço energético..... | 45 |
| Área de Vão Envidraçado -15% | 45 |
| Área de Vão Envidraçado - 25% | 47 |
| Área de Vão Envidraçado -30% | 49 |
| 4.1.2 Conforto térmico | 51 |
| 4.1.3 Necessidades de Aquecimento e Arrefecimento | 52 |
| 4.1.4 Custo ótimo de ciclo de vida | 53 |
| 4.2 REGIÃO DE COIMBRA | 55 |
| 4.2.1 Balanço energético..... | 55 |
| Área de Vão Envidraçado -15% | 55 |
| Área de Vão Envidraçado -25% | 56 |
| Área de Vão Envidraçado -30% | 57 |
| 4.2.2 Conforto térmico | 59 |
| 4.2.3 Necessidades de Aquecimento e Arrefecimento | 59 |
| 4.2.4 Custo ótimo de ciclo de vida | 61 |
| 4.3 REGIÃO DE BRAGANÇA | 63 |
| 4.3.1 Balanço energético..... | 63 |
| Área de Vão Envidraçado -15% | 63 |
| Área de Vão Envidraçado -25% | 64 |
| Área de Vão Envidraçado -30% | 66 |
| 4.3.2 Conforto térmico | 67 |
| 4.3.3 Necessidades de Aquecimento e Arrefecimento | 68 |
| 4.4 CUSTO ÓTIMO DE CICLO DE VIDA..... | 69 |
| 4.5 COMPARAÇÃO REGIÕES | 70 |
| Área de Vão Envidraçado -15% | 70 |
| Área de Vão Envidraçado -25% | 72 |
| Área de Vão Envidraçado -30% | 74 |
| 4.5.1 Custo Ótimo..... | 76 |
| Otimização da Solução de Lisboa - Conforto Térmico..... | 78 |
| 5 CONCLUSÕES..... | 81 |
| 5.1 TRABALHOS FUTUROS..... | 82 |
| 6 BIBLIOGRAFIA..... | 83 |
| ANEXOS..... | A1 |
| ANEXO I - VALORES DE CÁLCULO DE CUSTO ÓTIMO | A3 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| FIGURA 2.1: VITRAL PERÍODO GÓTICO | 6 |
| FIGURA 2.2: A) ESQUEMA DE JANELA DE HABITAÇÃO IDADE MÉDIA [25]; B) JANELA FRANCESA [26] | 7 |
| FIGURA 2.3: TIPOLOGIA DE JANELAS- [5] | 8 |
| FIGURA 2.4: CURVAS DE TRANSMISSÃO ESPECTRAL PARA SOLUÇÕES DE BAIXA EMISSIVIDADE..... | 10 |
| FIGURA 2.5: MODOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR | 13 |
| FIGURA 2.6: ESPECTRO DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA..... | 15 |
| FIGURA 2.7: TEMPERATURA DE REFERÊNCIA PARA ESPAÇOS CONDICIONADOS [18] | 22 |
| FIGURA 3.1: FACHADAS DO EDIFÍCIO..... | 25 |
| FIGURA 3.2: FRAÇÃO EM ESTUDO | 26 |
| FIGURA 3.3: EXPOSIÇÃO SOLAR NAS FACHADAS PARA VÁRIAS ESTAÇÕES [20] | 27 |
| FIGURA 3.4: ZONAS TÉRMICAS | 27 |
| FIGURA 3.5: TEMPERATURA EXTERIOR - ZONAS CLIMÁTICAS | 29 |
| FIGURA 3.6: EVOLUÇÃO DO SISTEMA DE PAREDES EM PORTUGAL [4] | 29 |
| FIGURA 3.7: GRÁFICO PADRÃO DE OCUPAÇÃO-DIAS ÚTEIS..... | 32 |
| FIGURA 3.8: GRÁFICO PADRÃO DE OCUPAÇÃO - RESTANTES DIAS..... | 33 |
| FIGURA 3.9: TIPO DE ILUMINAÇÃO (IMAGEM ADAPTADA DE [16])..... | 34 |
| FIGURA 3.10: GRÁFICO PADRÃO DE ILUMINAÇÃO-DIAS ÚTEIS | 35 |
| FIGURA 3.11: GRÁFICO PADRÃO DE ILUMINAÇÃO – RESTANTES DIAS | 35 |
| FIGURA 3.12: GRÁFICO PADRÃO DE EQUIPAMENTOS- DIAS ÚTEIS | 36 |
| FIGURA 3.13: GRÁFICO PADRÃO DE EQUIPAMENTOS – RESTANTES DIAS | 36 |
| FIGURA 3.14: ZONAS DE COLOCAÇÃO DE SOMBREAMENTO [16] | 38 |
| FIGURA 3.15: GRÁFICO COM VALORES DE U _{F0} PARA CAIXILHOS METÁLICOS COM CORTE TÉRMICO [23] | 39 |
| FIGURA 4.1: GRÁFICO DE BALANÇO ENERGÉTICO - PERÍODO DE AQUECIMENTO - LISBOA-15%..... | 45 |
| FIGURA 4.2: GRÁFICO DE BALANÇO ENERGÉTICO - PERÍODO DE ARREFECIMENTO - LISBOA-15%..... | 47 |
| FIGURA 4.3: GRÁFICO DE BALANÇO ENERGÉTICO - PERÍODO DE AQUECIMENTO - LISBOA-25%..... | 48 |
| FIGURA 4.4: GRÁFICO DE BALANÇO ENERGÉTICO - PERÍODO DE ARREFECIMENTO - LISBOA-25%..... | 49 |
| FIGURA 4.5: GRÁFICO DE BALANÇO ENERGÉTICO - PERÍODO DE AQUECIMENTO - LISBOA-30% | 50 |
| FIGURA 4.6: GRÁFICO DE BALANÇO ENERGÉTICO - PERÍODO DE ARREFECIMENTO - LISBOA-30%..... | 50 |
| FIGURA 4.7: GRÁFICO DE CONFORTO TÉRMICO INTERIOR - LISBOA | 51 |
| FIGURA 4.8: NECESSIDADES DE AQUECIMENTO TOTAIS-LISBOA | 52 |
| FIGURA 4.9: NECESSIDADES DE ARREFECIMENTO TOTAIS-LISBOA..... | 53 |
| FIGURA 4.10: ANÁLISE DO CUSTO ÓTIMO - LISBOA | 54 |
| FIGURA 4.11: GRÁFICO DE BALANÇO ENERGÉTICO - PERÍODO DE AQUECIMENTO - COIMBRA-15%..... | 55 |
| FIGURA 4.12: GRÁFICO DE BALANÇO ENERGÉTICO - PERÍODO DE ARREFECIMENTO - COIMBRA-15% | 56 |
| FIGURA 4.13: GRÁFICO DE BALANÇO ENERGÉTICO - PERÍODO DE AQUECIMENTO - COIMBRA-25%..... | 57 |
| FIGURA 4.14: GRÁFICO DE BALANÇO ENERGÉTICO - PERÍODO DE ARREFECIMENTO - COIMBRA-25% | 57 |
| FIGURA 4.15: GRÁFICO DE BALANÇO ENERGÉTICO - PERÍODO DE AQUECIMENTO - COIMBRA-30% | 58 |
| FIGURA 4.16: GRÁFICO DE BALANÇO ENERGÉTICO - PERÍODO DE ARREFECIMENTO - COIMBRA-30% | 58 |
| FIGURA 4.17: GRÁFICO DE CONFORTO TÉRMICO INTERIOR - COIMBRA | 59 |
| FIGURA 4.18: NECESSIDADES DE AQUECIMENTO TOTAIS-COIMBRA | 60 |
| FIGURA 4.19: NECESSIDADES DE ARREFECIMENTO TOTAIS-COIMBRA | 61 |
| FIGURA 4.20: ANÁLISE DO CUSTO ÓTIMO - COIMBRA | 62 |
| FIGURA 4.21: GRÁFICO DE BALANÇO ENERGÉTICO - PERÍODO DE AQUECIMENTO - BRAGANÇA-15% | 63 |
| FIGURA 4.22: GRÁFICO DE BALANÇO ENERGÉTICO - PERÍODO DE ARREFECIMENTO - BRAGANÇA-15% | 64 |
| FIGURA 4.23: GRÁFICO DE BALANÇO ENERGÉTICO - PERÍODO DE AQUECIMENTO - BRAGANÇA-25% | 65 |
| FIGURA 4.24: GRÁFICO DE BALANÇO ENERGÉTICO - PERÍODO DE ARREFECIMENTO - BRAGANÇA-25% | 66 |
| FIGURA 4.25: GRÁFICO DE BALANÇO ENERGÉTICO - PERÍODO DE AQUECIMENTO - BRAGANÇA-30% | 66 |
| FIGURA 4.26: GRÁFICO DE BALANÇO ENERGÉTICO - PERÍODO DE ARREFECIMENTO - BRAGANÇA-30% | 67 |
| FIGURA 4.27: GRÁFICO DE CONFORTO TÉRMICO INTERIOR - BRAGANÇA..... | 68 |
| FIGURA 4.28: NECESSIDADES DE AQUECIMENTO TOTAIS-BRAGANÇA..... | 68 |
| FIGURA 4.29: NECESSIDADES DE ARREFECIMENTO TOTAIS-BRAGANÇA | 69 |
| FIGURA 4.30: ANÁLISE DO CUSTO ÓTIMO - BRAGANÇA | 69 |
| FIGURA 4.31: NECESSIDADES DE AQUECIMENTO TOTAIS-15% | 71 |
| FIGURA 4.32: NECESSIDADES DE ARREFECIMENTO TOTAIS-15%..... | 71 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 4.33: GRÁFICO DE CONFORTO TÉRMICO INTERIOR - 15% | 72 |
| FIGURA 4.34: NECESSIDADES DE AQUECIMENTO TOTAIS -25% | 73 |
| FIGURA 4.35: NECESSIDADES DE ARREFECIMENTO TOTAIS-25%..... | 73 |
| FIGURA 4.36: GRÁFICO DE CONFORTO TÉRMICO INTERIOR-25% | 74 |
| FIGURA 4.37: NECESSIDADES DE AQUECIMENTO TOTAIS-30% | 75 |
| FIGURA 4.38: NECESSIDADES DE ARREFECIMENTO TOTAIS-30%..... | 75 |
| FIGURA 4.39: GRÁFICO DE CONFORTO TÉRMICO INTERIOR -30% | 76 |
| FIGURA 4.40: ANÁLISE DE CUSTO ÓTIMO -15%..... | 77 |
| FIGURA 4.41: ANÁLISE DE CUSTO ÓTIMO -25%..... | 77 |
| FIGURA 4.42: ANÁLISE DE CUSTO ÓTIMO -30%..... | 78 |
| FIGURA 4.43: ANÁLISE DO CUSTO ÓTIMO- SOLUÇÕES DE CONFORTO- LISBOA | 79 |

Índice de Tabelas

| | |
|--|----|
| TABELA 2.1: ESQUEMA REPRESENTATIVO DE DADOS DE INPUT E OUTPUT DO PROGRAMA ENERGYPLUS | 21 |
| TABELA 3.1: DEFINIÇÃO DE ZONAS TÉRMICAS | 27 |
| TABELA 3.2: VALORES DE REFERÊNCIA REFERENTES ÀS ZONAS EM ESTUDO [13] | 28 |
| TABELA 3.3: MATERIAIS DOS ELEMENTOS OPACOS E OS SEUS COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO TÉRMICA [22] | 30 |
| TABELA 3.4: RELAÇÃO JANELA/PAREDE DA SOLUÇÃO BASE | 31 |
| TABELA 3.5: ENERGIA POR PESSOA E M ² PARA CADA ATIVIDADE [16] | 33 |
| TABELA 3.6: VALORES APROXIMADOS DE FRAÇÃO DE RETORNO DE AR, FRAÇÃO RADIANTE E FRAÇÃO VISÍVEL [16]..... | 34 |
| TABELA 3.7: VALORES DE RUGOSIDADE DO TERRENO, RETIRADOS DO DESPACHO Nº15793-K/2013 | 37 |
| TABELA 3.8: CASOS DE ANÁLISE | 41 |
| TABELA 3.9: COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO TÉRMICA SUPERFICIAIS DE REFERÊNCIA DE VÃOS ENVIDRAÇADOS PARA PORTUGAL CONTINENTAL RETIRADOS DA PORTARIA Nº349-B/2015 [13] | 42 |
| TABELA 4.1: VALORES DE MELHORIA DA SOLUÇÃO DE CUSTO ÓTIMO-LISBOA..... | 54 |
| TABELA 4.2: VALORES DE MELHORIAS DA SOLUÇÃO DE CUSTO ÓTIMO - COIMBRA | 62 |
| TABELA 4.3: VALORES DE MELHORIA DA SOLUÇÃO DE CUSTO ÓTIMO | 70 |
| TABELA A.1: VALORES DE CUSTO GLOBAL- SOLUÇÕES DE LISBOA | A3 |
| TABELA A.2: VALORES DE CUSTO GLOBAL- SOLUÇÕES DE LISBOA | A3 |
| TABELA A.3: VALORES DE CUSTO GLOBAL- SOLUÇÕES DE LISBOA | A4 |

Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolo

Abreviaturas

Esp.- espessura

Hi,Lo,Med - High, Low, Medium

Ref.- Refletante

Spec Sel - spectrum selective

Siglas

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

CE - Certificado Energético

DOE - United States Department of Energy's

EPBD - Energy Performance in Buildings Directive

HVAC - Heating Ventilation and air Conditioning

INETI - Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação

LCC - Life Cycle Cost

LCCA - Life Cycle Cost Analysis

LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia

RCCTE - Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios

RECS - Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços

REH - Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação

RSECE - Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização dos Edifícios

SCE - Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios

UE - União Europeia

Símbolos

A - Área (m^2)

A_p - Área útil de pavimento (m^2)

C - Velocidade da luz (m/s)

C_a, i – custo anual de energia do ano i ($€/m^2$)

C_g - Custo global ($€/m^2$)

$C_{g, REF}$ - Custo global de referência ($€/m^2$)

C_i, C_l - Custo inicial ($€/m^2$)

E - Espessura (m)

E - Radiância (W/m^2)

E^0 - Radiância de um corpo negro (W/m^2)

F - Frequência (Hz)

F_{pu} – Fator de conversão de energia útil para energia primária (kWh_{EP}/kWh)

G - Irradiação (W/m^2)

h - Constante de Planck ($6,625 \times 10^{-34}$ J.s)

h_c - Condutância térmica superficial por convecção ($W/m^2 \cdot K$)

N_{ic} - Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento ($kWh/m^2 \cdot ano$)

Nvc - Necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento (kWh/m². ano)

Q - Fluxo de calor (W/m²)

Q - Quantidade de Calor (W)

QAQS - Energia para águas quentes sanitárias

Qaquecimento - Energia para Aquecimento

Qarrefecimento - Energia para Arrefecimento

R - Resistência Térmica (m². °C/W)

R - Taxa de desconto percentual

Rd, i – Fator de desconto do ano i

Rse - Resistência Térmica Superficial Exterior (m². °C/W)

Rsi - Resistência Térmica Superficial Interior (m². °C/W)

Rt - Resistência Térmica Total (m². °C/W)

SHGC - Solar Heat Gain Coefficient (%)

T - Temperatura absoluta (K)

T₁ - Temperatura da Superfície (°C)

T₂ - Temperatura do Ambiente (°C)

T_{odb} – Temperatura exterior (°C)

T_{zone} - Temperatura da Zona a ser simulada (°C)

U - Coeficiente de Transmissão Térmica (W/m². °C)

Vf - Valor residual dos sistemas efetuados no fim do período de análise

VT - Visible transmittance (%)

W_{spd} – Velocidade do Vento (m/s)

α – Coeficiente de absorção

ε - Emissividade

λ- Condutibilidade Térmica (W/m². °C)

λ - Comprimento de onda (μm)

η - Eficiência nominal

ρ - Coeficiente de reflexão

σ - Constante de Stefan-Boltzmann (5,67x10⁻⁸ W/m². K⁴)

τ - Coeficiente de transparência ou transmissividade

τ - Tempo de vida útil do edifício

1 Introdução

1.1 Enquadramento do Tema

Atualmente o sector dos edifícios representa 40% do consumo de energia na União Europeia, ocupando uma percentagem de 30% em Portugal. Prevendo um aumento no consumo de energia devido à expansão do sector, torna-se imperativo a redução do mesmo através de soluções de eficiência energética provenientes de fontes renováveis que poderão diminuir o consumo em mais de 50%, obtendo também um impacto no ambiente, diminuindo as emissões de dióxido de carbono até 400 milhões de toneladas anuais [1]. Valores que vão de encontro ao compromisso da União Europeia, na obtenção dos resultados de redução dos gases com efeito de estufa em pelo menos 20% até 2020 e o compromisso, de manter o aumento da temperatura global abaixo dos 2°C impostos no Protocolo de Quioto, sobre as alterações climáticas.

Por forma a alcançar os objetivos propostos, a União Europeia criou uma Diretiva 2010/31/UE reformulada a 19 de maio e conhecida como EPBD (recast), onde são estabelecidos requisitos para a melhoria do desempenho energético e conforto térmico dos edifícios. A diretiva é aplicável maioritariamente a novas construções e renovações, que sejam efetuadas a uma área igual ou superior a 25% da envolvente do edifício, na envolvente do edifício ou em sistemas técnicos, onde o custo seja 25% ou superior ao valor do edifício.

O decreto de lei 118/2013 vem revisar a legislação nacional referente ao SCE, ao REH (antigo RCCTE) e o RECS (antigo RSECE) para que esteja de acordo com os novos requisitos impostos com a reformulação da diretiva. A legislação vem também clarificar a separação clara dos documentos REH e RECS, assim o primeiro (REH) é apenas referente a edifícios destinados à habitação e o último destinado a edifícios de comércio e serviços. Uma das obrigações impostas com a atualização da legislação do SCE é a apresentação da classificação energética por parte de todas as entidades que publiquem anúncios com vista à venda ou aluguer. A classe energética, apresentada no certificado CE, é dividida em 8 classes de A+ a F. A classificação mínima imposta pela nova legislação é de B-, para novas construções e reabilitações de grandes dimensões, que cumpram os requisitos mínimos exigidos.

Torna-se também necessária a avaliação do custo de ciclo de vida, que leva ao nível ótimo de rentabilidade, considerando não só os custos de investimento, mas também os de manutenção e de gastos com energia, articulando-os com os desempenhos energéticos. Pretende-se com esta medida a consideração do desempenho e retorno energético a longo prazo devido aos edifícios possuírem um longo ciclo de renovação [2].

A metodologia de cálculo para o desempenho energético dos edifícios tem de ter em conta, as normas europeias sendo coerente com a legislação aplicada pela União Europeia. Aspetos, como as características térmicas reais do edifício, ventilação natural, instalações de ar condicionado, condições climáticas interiores e exteriores, localização e posicionamento dos sistemas solares passivos, são

fatores essenciais a ter em conta para a obtenção de um bom desempenho energético. É ainda necessário considerar a influência positiva de iluminação natural, sistemas solares ativos e de sistemas de aquecimento e produção de energia provenientes de fontes renováveis [1].

O aproveitamento da energia solar passiva vem de encontro ao cumprimento dos objetivos referenciados para a obtenção de um melhor desempenho energético, melhorando as condições dos edifícios, diminuindo a utilização e os custos de equipamentos de ar condicionado. A conceção, posicionamento e orientação das soluções construtivas, tendo em conta as condições climatéricas da zona de localização, podem potencializar o aproveitamento da energia solar, controlando o calor gerado pelo sol através dos elementos construtivos [2]. As janelas são um dos elementos mais benéficos devido à sua elevada captação da radiação solar e aumento da iluminação natural podendo para situações de aquecimento captar e armazenar os ganhos solares e em situações de arrefecimento através de sombreamento e ventilação natural libertar o calor, melhorando o aquecimento e arrefecimento passivos para além de diminuir o consumo de eletricidade e iluminação artificial, usando a luz natural. São elementos que podem influenciar e produzir um impacto significativo na eficiência energética.

1.2 Motivações

Com o aumento da utilização do vidro no sector da construção, e este ocupando cada vez uma maior área de fachada é necessário analisar a influência que os vidros apresentam nos edifícios. Como são pontos de entrada de luz natural, de ganhos e perdas solares e permitem a ventilação natural, tornam-se elementos cruciais para um bom funcionamento de qualquer edifício.

Ao analisar os documentos de estudo na área da engenharia civil, é de notar que os sistemas de envidraçado ainda apresentam documentação pouco explorada, comparando com a análise de fachadas opacas, sendo ainda mais reduzida relativamente a análises de custo de ciclo de vida de um sistema de janelas.

Outro fator que levou ao surgimento deste tema é o conforto térmico. Com o desenvolver das tecnologias tem se tornado cada vez mais um fator de peso, mas a documentação existente, REH, RECS não garante o conforto no interior do edifício assim, cumprir apenas o regulamento vigente não é suficiente. É necessário então em fase de projeto, aplicar parâmetros mais restritos às análises efetuadas de forma a que todos os cálculos realizados sejam semelhantes aos valores da fase de utilização.

Observando a falha existente na documentação disponível, surgiu com o presente documento uma oportunidade de analisar o comportamento de sistemas de envidraçado. Observando a influência de um envidraçado numa fração e o seu custo-benefício ao longo do tempo de vida útil selecionado, considerando o conforto térmico um fator a garantir.

1.3 Objetivos do Trabalho

Este trabalho tem como objetivo a análise de diferentes soluções de envidraçado numa fração destinada à habitação. Como foco principal pretende-se observar as alterações produzidas pelos vários casos em estudo e a influência dos sistemas envidraçados numa habitação, obtendo-se soluções de custo ótimo. São analisados os balanços energéticos das zonas térmicas, as necessidades de aquecimento e arrefecimento, o conforto térmico e o custo associado a cada caso.

A avaliação do custo, é efetuada pelo método do custo de ciclo de vida considerando não apenas o investimento inicial, mas todos os gastos envolvidos durante o período de vida útil do sistema e as necessidades de energia primária de cada solução. O conforto térmico é um objetivo secundário que se pretende alcançar em análises de custo – benefício com parâmetros mais restritos que a análise de custo ótimo inicial.

1.4 Organização estrutural do trabalho

A dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos que serão descritos seguidamente.

O primeiro e presente capítulo é a introdução, onde se pretende executar um enquadramento do tema em análise, indicar os objetivos que se pretende atingir e a estrutura em que o trabalho foi disposto.

O segundo capítulo, estado do conhecimento aborda as matérias introdutórias ao estudo dividindo-se em cinco subcapítulos, o de vãos envidraçados, as transferências de calor, o desempenho do vidro, o sistema de cálculo EnergyPlus e a análise de custo ciclo de vida. No primeiro subcapítulo é feito um enquadramento histórico dos sistemas de envidraçado e a sua evolução até aos tempos correntes. São ainda apresentadas as soluções existentes e como estas variam e diferem entre si. O segundo subcapítulo aborda conceitos básicos das transferências de calor que influenciam os sistemas envidraçados. No terceiro subcapítulo são apresentados fatores relevantes para a definição das características do vidro. O quarto subcapítulo apresenta o programa de cálculo utilizado e por último, o quinto subcapítulo é referente ao método de cálculo da análise do custo de ciclo de vida imposto pela União Europeia através da Diretiva 2010/31/EU.

No terceiro capítulo é apresentado o caso de estudo a desenvolver, indicando as condições climáticas onde o modelo será analisado. São explicados e justificados todos os parâmetros considerados na solução inicial bem como, as suas alterações ao longo das simulações estudadas.

O quarto capítulo expõe os resultados obtidos e a sua observação, comparando os valores obtidos no EnergyPlus e utilizando método de cálculo de custo ótimo.

O quinto e último capítulo, expõe as conclusões obtidas na execução do presente documento e ainda faz referência a trabalhos futuros que possam ser efetuados no seguimento desta dissertação.

2 Estado do Conhecimento

No presente capítulo, dividido em cinco secções, é efetuada uma introdução às matérias relevantes para o desenvolver da presente dissertação. A primeira secção apresenta os vãos envidraçados, a sua história e os sistemas existentes. A segunda introduz os conhecimentos de transferências de calor através de condução, convecção e radiação. Na terceira secção é exposto os fatores importantes para a caracterização do desempenho do vidro. A secção seguinte faz uma introdução ao programa de simulação e por último a quinta secção é dedicada à metodologia de cálculo do custo ótimo.

2.1 Vãos envidraçados

2.1.1 Enquadramento Histórico

As janelas são aberturas nas fachadas, criadas com o objetivo de promoção da circulação de ar e entrada de luz, sendo dispostas nos tempos atuais com propósitos estéticos e arquitetónicos para além da sua funcionalidade.

Desde o seu aparecimento as janelas têm sido preenchidas com materiais como a pedra, madeira, barras de ferro, materiais translúcidos, como finos panos de vidro ou mica, ou até mesmo com papel, sendo este último um material mais utilizado no extremo oriente. Atualmente o material mais comum é o vidro existindo algumas soluções de plástico transparente.

As primeiras representações de janelas são encontradas em pinturas no Egipto, onde foram representadas como aberturas nas paredes cobertas com tapeçaria, e em relevos na Assíria, representadas como mais largas do que altas e separadas por pequenas colunas.

A devoção do antigo povo grego em habitações construídas em volta de pátios levou ao quase desaparecimento das janelas, devido à iluminação provir das aberturas de portas que faziam ligação aos pátios. O registo do aparecimento das primeiras janelas envidraçadas, com caixilho de bronze como suporte do vidro, foi assinalado no período do império romano em pompeia, onde se assume que seriam utilizados nas zonas de banho para evitar a saída do calor. Apesar de serem existentes soluções de envidraçados na época romana estes eram exceção, os materiais mais utilizados eram a mica, conchas e o mármore.

As janelas começaram a ser mais recorrentes e numerosas em igrejas bizantinas no início do cristianismo sendo frequentemente envidraçadas, recorrendo a técnicas como a utilização do mármore para fixar os vitrais nas aberturas. A modificação e adaptação da técnica foi efetuada por parte dos construtores de mesquitas islâmicas, que ao alterar a utilização do cimento por mármore na moldura conseguiram obter uma maior liberdade na criação de padrões utilizando vidros de diferentes tonalidades. No entanto o desenvolvimento e técnica da utilização do vidro só atingiu a sua evolução mais significativa nos séculos XII e XIII nas regiões Norte e Oeste da Europa, onde a utilização de tiras de chumbo, no lugar do cimento e do mármore para a separação das diferentes peças de vidro, permitiu desenhos mais intrínsecos tornando possível adornar as catedrais góticas (Figura 2.1) com vitrais

detalhados. A janela em arco tornou-se uma característica importante em edifícios de alvenaria na arquitetura medieval europeia e islâmica.

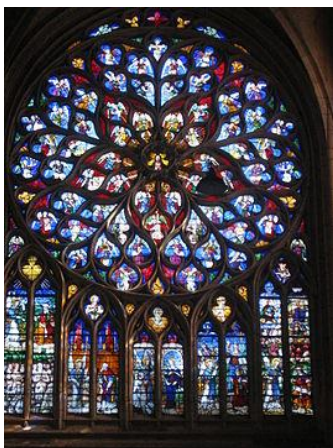
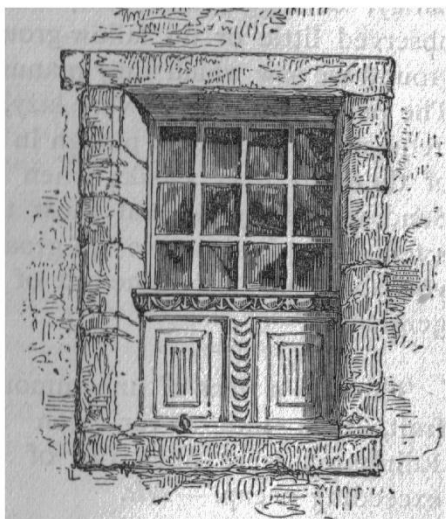


Figura 2.1:Vital período Gótico

A nível habitacional, as janelas eram na sua maioria de formato retangular e fechadas com persianas, grelhas ou grades. Com a queda do valor do vidro no fim da idade média na Europa, a utilização de janelas envidraçadas tornou-se mais recorrente. Inicialmente os caixilhos eram colocados na parte superior da abertura, sendo a parte inferior ainda fechada com persianas (Figura 2.2-a)). Só mais tarde no século XV, as persianas foram sendo substituídas por caixilhos com painéis moveis de dupla folha, o que levou ao uso padrão de abertura retangular na maioria dos edifícios devido à facilidade de encaixe dos caixilhos.

Durante o período renascentista em França e Itália, as dimensões das janelas ajustaram-se às proporções clássicas sendo adicionadas nas laterais pilastras e colunas. No período barroco estes elementos exteriores das janelas eram extremamente ornamentados com consolas, figuras humanas, máscaras. No final do período renascentista os franceses desenvolveram uma janela que permaneceu como a forma aceite no continente europeu, popularmente conhecida como a janela francesa (Figura 2.2-b)), com caixilhos de madeira e de abertura para o interior com a ajuda de dobradiças podendo alongar-se até ao assoalho. Em Inglaterra no século XVII e nos Estados Unidos durante os séculos XVIII e XIX a janela mais comum, era a janela deslizante vertical [3]

Na atualidade, o impacto da indústria levou a uma grande utilização de estruturas metálicas para soluções de janelas, maioritariamente a nível residencial, o que permitiu o aumento das áreas de vidro nas fachadas, podendo cobrir toda a área de parede ou mesmo todo o edifício, solução existencial em alguns edifícios comerciais. As necessidades inerentes à poupança de energia, custo e conforto levaram também a evolução dos sistemas de vidros e caixilhos obtendo-se soluções mais duradouras e viáveis para cada necessidade. Podendo existir soluções simples, duplas, triplas e mesmo quadruplas de sistemas de vidro.



a)



b)

Figura 2.2: a) Esquema de janela de Habitação idade média [25]; b) Janela Francesa [26]

2.1.2 Tipologias de Janelas

Com a evolução da janela também a sua forma foi modificando e se ajustando para que a sua utilização se torne mais funcional tendo em conta a necessidade dos seus utilizadores e a evolução dos sistemas. Cada tipologia de janela é distinta através de movimentação de folha diferente. Onde folha é considerada a parte móvel do caixilho.

As tipologias mais comuns de Janelas são [4]:

- Janela de Correr – Definida como um sistema de duas ou mais folhas colocadas em banda que se movem por translação horizontal;
- Janela Inglesa – Sistema de uma ou duas folhas que através da rotação em torno de um eixo vertical abre para o exterior. O eixo de rotação encontra-se ao longo da couceira de rotação, que tem por definição montante da folha que recebe os elementos de rotação;
- Janela Guilhotina – Sistema de folhas sobrepostas que efetuam o seu movimento por translação vertical;
- Janela Italiana – Sistema de uma única folha que por rotação horizontal abre para o interior ou exterior. É sustentada por compassos, sendo estes os elementos que estabelecem o grau de abertura da janela;
- Janela Acordeão – Movimento semelhante ao fole de um acordeão onde duas ou mais folhas se movem através de translação horizontal em conjunto com rotação vertical das várias folhas;
- Janela Batente – Semelhante ao tipo de janela inglesa excetuando a sua abertura que é feita para o interior;

- Janela Oscilo-Batente – Sistema onde a folha móvel possui dois tipos de movimento batente e basculante que são acionados conforme as posições do mecanismo de ativação, por norma costuma ser o puxador da janela;
- Janela Basculante – Sistema de uma folha móvel onde rotação é efetuada em torno do eixo horizontal situado na travessa inferior, sendo esta uma peça resistente horizontal;
- Janela de Correr paralela e Basculante – Tal como a janela oscilo-batente o presente sistema possui dois movimentos. Por norma este tipo de sistemas costuma ser composto por duas folhas onde uma se encontra fixa e a outra move-se através de translação horizontal, paralelamente à folha fixa, podendo também abrir por basculamento;
- Janela Pivotante Horizontal – Sistema que abre através da rotação do eixo horizontal. Por norma esse eixo costuma coincidir com o eixo de gravidade do caixilho;
- Janela Pivotante Vertical – Semelhante ao sistema Pivotante Horizontal a janela abre em torno de um eixo vertical através de rotação em volta deste;
- Janela Projetante – Sistema de funcionamento inverso à janela basculante, mas de abertura exterior. A rotação é efetuada em torno da travessa superior;

Na Figura 2.3 é possível observar algumas das tipologias de janelas cima referidas.

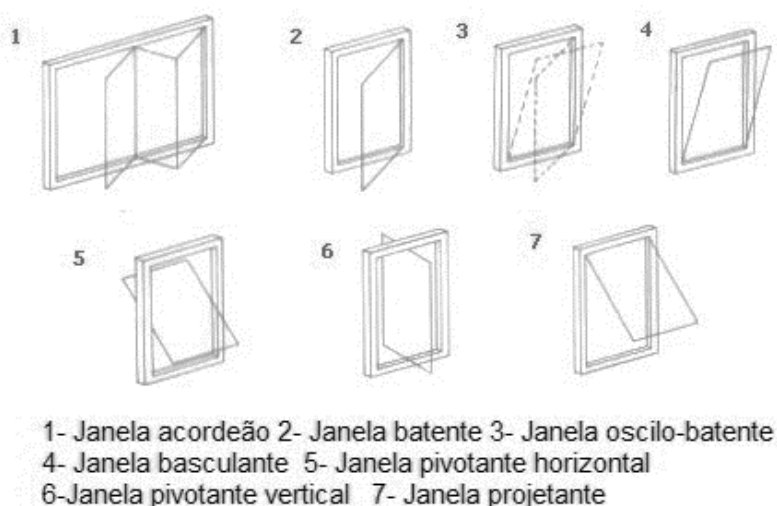


Figura 2.3: Tipologia de Janelas- [5]

2.1.3 Sistemas de Janelas

Vão envidraçados são sistemas que permitem a entrada de luz natural e potencializam o conforto visual.

As principais características que definem uma janela eficiente são um maior conforto visual térmico e acústico, a estanquidade à água e ao ar e, que através das suas características e orientação ajude a melhorar o desempenho energético e económico do edifício. Por forma a melhorar o desempenho das janelas para cada tipo de necessidade, localização e clima é preciso ter em consideração o sistema de caixilho e a solução de envidraçado a utilizar mais adequada.

Caixilhos

O desenvolvimento das soluções envidraçadas levou a que também os seus caixilhos fossem sendo melhorados. Hoje em dia existem mais soluções de caixilho sendo os materiais mais utilizados em Portugal:

- Alumínio com corte térmico
- PVC
- Madeira

O caixilho tem como principal objetivo a sustentação dos vidros, garantido a continuidade do isolamento térmico e acústico conseguido pelo sistema de vidros. Deve também ser resistente aos esforços resultantes da força das intempéries e da sua utilização.

O corte térmico proporciona um melhor comportamento do caixilho, tendo ficado em desuso soluções sem corte térmico por possuírem um pior desempenho.

Na obtenção de um sistema de envidraçado é preciso ter atenção não só as características dos vidros que compõem a solução, mas de todo o sistema, desde o caixilho ao tipo de sombreamento.

Vidros

Com o desenvolvimento do estudo dos materiais o vidro foi sofrendo alterações e melhorias para um melhor desempenho face às necessidades. A colocação de revestimentos e películas bem como a alteração da sua cor são algumas das técnicas encontradas para melhorar as características. Algumas das soluções de melhoria utilizadas são:

- Vidros Coloridos

Os vidros encontram-se disponíveis em várias tonalidades que absorvem parte do calor solar e bloqueiam a luz do dia. A sua utilização altera a cor da janela e ajuda a criar uma privacidade visual durante o período diurno invertendo-se no período noturno.

São utilizados maioritariamente para reduzir a quantidade de energia solar transmitida pelo vidro e diminuir o brilho intenso do exterior mantendo a sua transparência pelo interior.

As cores mais comuns são o cinza, o bronze o verde e o azul sendo que estas não afetam excessivamente o espectro de cores visualizado não sendo também agressivas a nível arquitetónico e estético.

Os vidros coloridos são formulados para aumentar a sua capacidade de absorção para o espectro de radiação solar o que leva ao aquecimento do vidro sendo depois transferido para o interior por radiação

e convecção. O aquecimento do vidro a partir da absorção de calor leva ao desconforto junto ao envidraçado.

A redução dos ganhos de calor para este tipo de soluções não é extrema comparando com outro tipo de soluções, afetando maioritariamente a transmissão de luz solar. A alteração de espessura cor e tipo de fabrico afetam o comportamento de cada sistema de vidro variando também consoante os fabricantes.

- Vidros Low Iron

São vidros que possuem uma transparência de 99% por possuírem menores quantidades de oxido de ferro presentes na manufaturação do vidro, o que melhora a sua transmissividade possuindo um valor superior comparando com um vidro simples de espessura superior.

- Vidros Low-e

As trocas térmicas de calor ocorrem maioritariamente por radiação reduzindo a emissividade de uma janela, melhorando consideravelmente as suas propriedades isolantes. Ao diminuir a emissividade de um vidro diminui-se a quantidade de calor que atravessa o mesmo refletindo uma percentagem superior a um vidro regular.

Na Figura 2.4 é possível observar que ao diminuir a emissividade do envidraçado diminui-se a quantidade de radiação infravermelha que é transmitida através das janelas obtendo-se maioritariamente a transmissão de radiação visível ao se diminuir a emissividade do vidro.

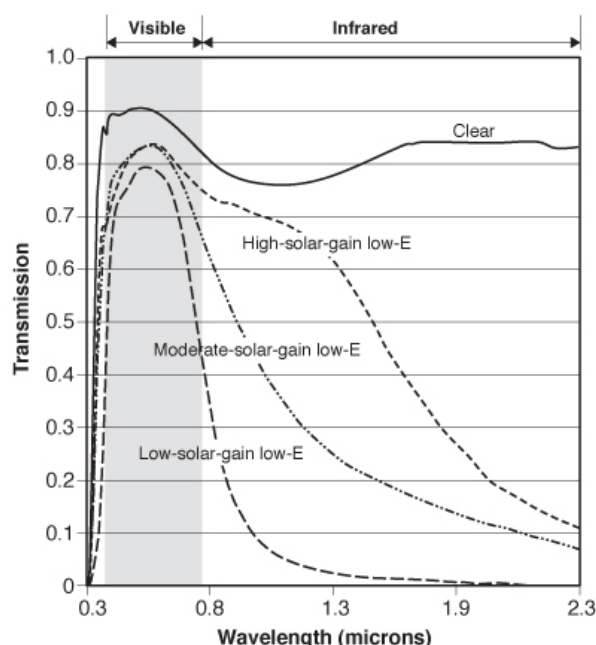


Figura 2.4: Curvas de Transmissão espectral para soluções de baixa emissividade

Existem ainda soluções conhecidas como SPEC SEL, ou revestimentos espectralmente seletivos que permitem manipular qual a parte do espectro de energia que é transmitido e refletido de modo a que os comprimentos de onda desejáveis sejam transmitidos.

As camadas de revestimento Low-e podem ser colocadas de duas maneiras por pulverização e por aplicação pirolítica. A primeira como o nome indica é colocada através da pulverização dos materiais constituintes por norma metais por camadas possuindo uma espessura muito reduzida apesar de poder ter até treze camadas. São conhecidas por ter uma fraca resistência a ataques mecânicos e químicos.

Um revestimento colocado por aplicação pirolítica é tipicamente uma cobertura metálica onde esta se encontra fundida com o próprio vidro sendo aplicada através de uma deposição química usando vapor. O revestimento aplicado com este método é muito mais resistente podendo estar exposto ao ar e limpo com materiais de limpeza de vidros sem ser danificado.

- Vidros com película de reflexão

Vidros com reflexão são soluções que possuem revestimento que diminuí a quantidade de energia solar transmitida através do aumento da reflexão do vidro. Os revestimentos consistem geralmente em camadas finas metálicas ou de óxido metálico podendo ser aplicadas em vidros simples ou de cor. Alguns dos materiais constituintes são:

Ref. A- Aço Inoxidável

Ref. B- Titânio

Ref. C- Estanho

Ref. D- Óxido de estanho

A quantidade de calor transmitido pelo vidro pode ser reduzida consoante a espessura, a refletividade e a localização do revestimento no sistema envidraçado podendo se dividir em três categorias (*high*, *medium*, *low*) em que cada um representa um nível de transmissão para cada tipo de revestimento. O revestimento pode ainda ser aplicado como uma película sendo eficazes a diminuir os ganhos solares, mas de baixa durabilidade.

Tal como os vidros coloridos durante o período diurno os vidros, devido as suas características de reflexão criam privacidade comportando-se como um espelho no exterior, mas permitindo a visualização pelo interior. No período noturno o inverso ocorre diminuindo a privacidade dos utilizadores quando as luzes se encontram acionadas.

Câmara de Preenchimento

A câmara de preenchimento é definida pelo espaço existente entre dois panos de vidro. A criação da divisão física entre os panos permite, num sistema de janelas um melhor conforto térmico e acústico em comparação com a utilização de um pano de vidro simples, mas apenas em situações onde a selagem do sistema seja devidamente garantida.

Convencionalmente, o gás mais utilizado é o ar, constituído maioritariamente por azoto e por oxigénio. Com a evolução dos sistemas de envidraçados também os gases utilizados evoluíram, atualmente no sector de vendas existem outras soluções de gás de preenchimento, como o Árgon o Cripton e o Xénon.

São gases nobres que apresentam uma maior densidade que o ar, diminuindo as transferências de calor do sistema não afetando a entrada de luz pelo vidro. Possuem também características como não serem reativos e não possuírem odor.

O processo de produção destes gases tem origem no tratamento do ar atmosférico, o seu valor de mercado é elevado, aumentando proporcionalmente consoante o nível de purificação do ar. É ainda importante que o preenchimento da câmara seja feito para que o gás não seja misturado com o ar, mantendo a pureza do gás e das suas características. Para que sistemas com gases nobres funcionem no potencial das suas qualidades, garantindo um desempenho térmico elevado a longo prazo é necessário que a selagem mantenha a suas características com o decorrer do tempo e a estanquidade se mantenha constante. A qualidade do material, a montagem do sistema e principalmente o controlo da selagem são fatores que definem o comportamento do gás e a estanquidade do sistema [6].

O Árgon é aquele que apresenta custos mais controlados, para uma solução eficaz, apesar de o Kriptón e o Xénon apresentarem valores ligeiramente superiores de desempenho térmico, por apresentarem uma maior densidade [7]. Ao utilizar árgon como gás na câmara de preenchimento é possível melhorar até 15% a capacidade de isolamento térmico comparando com uma solução com ar, aumentando ainda o conforto térmico no interior e diminuindo a pegada de carbono. O melhor comportamento deste gás é na combinação deste com vidros de baixa emissividade [8].

Sombreamento

Um dispositivo de sombreamento é geralmente aplicado para desempenhar funções de proteção solar, isolamento térmico e gestão do controlo de privacidade, aumentando os níveis de conforto habitacional quando bem dimensionado.

Existem vários tipos de dispositivos de sombreamentos de aplicação exterior e interior. Em Portugal as soluções mais aplicadas exteriormente em edifícios multifamiliares são soluções de persianas de réguas plásticas, sendo visíveis soluções com portadas maioritariamente em moradias.

É ainda importante referir que as propriedades das soluções de sombreamento como a reflexão, a transmissão e o material influenciam o seu comportamento.

2.2 Transferência de Calor

Ao analisar as transferências de calor que ocorrem através de um envidraçado, é possível um melhor seguimento e compreensão sobre o seu comportamento.

Para que transferências de calor ocorram é necessário haver um desequilíbrio de temperaturas em duas zonas, como por exemplo no caso de um edifício, entre o exterior e o seu interior. Com o objetivo de encontrar um estado de equilíbrio, os fluxos de calor ocorrem sempre de zonas com temperaturas elevadas para zonas com menores valores de temperatura. Com a permanente variação das condições dos parâmetros em análise como a temperatura e a exposição solar, a transmissão de calor ocorre em

regime não-estacionário¹. De forma a simplificar o método de estudo é considerado que as condições dos sistemas se mantêm constantes por um período de tempo originando uma transmissão de calor em regime estacionário².

A Figura 2.5 é ilustrativa do processo da transferência de calor existindo três métodos distintos pelos quais a troca de calor pode ocorrer, por condução, convecção e radiação. Enquanto os dois primeiros mecanismos implicam o contacto direto entre os corpos para que a transferência de calor ocorra, a radiação não se encontra sujeita a tal condição.

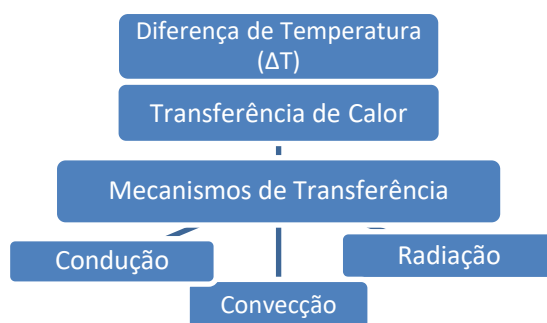


Figura 2.5: Modos de Transferência de Calor

No caso específico dos envidraçados a condução ocorre através do caixilho e do vidro, a convecção através da câmara de preenchimento de sistemas de vidro duplos ou triplos e a radiação ocorre através das superfícies dos vidros.

2.2.1 Condução

A transferência de calor por condução pode ocorrer entre corpos sólidos ou fluídos, requerendo um contacto direto entre os corpos. É importante reter que para um dado material, corresponde um estado de agitação molecular que é tanto maior quanto a sua temperatura. Numa situação entre duas zonas a transmissão ocorrerá assim da zona com maior estado de agitação e por associação maior temperatura, para a outra até se atingir um estado de equilíbrio entre ambas. A transmissão vai ocorrendo entre as várias camadas até se atingir um equilíbrio global. [9]

A determinação do fluxo de calor é dada pelo produto entre a quantidade de calor e a área da superfície sendo esta última perpendicular ao sentido do fluxo, visível na equação 2.1.

$$q = \frac{Q}{A} \quad (W / m^2) \quad (2.1)$$

Onde Q é a quantidade de calor em *Watts* e A a área em m².

Joseph Fourier na criação da sua teoria analítica do calor e utilizando a avaliação experimental da condução de calor criada por Biot, chegou à conclusão que o fluxo de calor numa dada direção é

¹ As condições do sistema são dependentes do fator tempo variando ao longo do mesmo

² As condições do sistema são permanentes e não variam ao longo do tempo

proporcional ao gradiente de temperatura nessa direção [10]. Assim surge a *Lei de Fourier*, onde para uma situação de condução unidirecional segundo x obtém-se a equação 2.2.

$$q_x = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (w / m^2) \quad (2.2)$$

Onde λ é a condutibilidade térmica do material. A presença do sinal menos na equação advém do facto das transferências de calor se darem das temperaturas elevadas para as menores.

A constante de proporcionalidade da equação, a condutibilidade térmica (λ) é uma característica que mostra como cada material se deixa atravessar pelo calor, sendo o seu valor único para cada um. Quanto mais baixo for o seu valor mais difícil se torna o calor atravessar, sendo materiais com valores reduzidos bons isolantes térmicos.

2.2.2 Convecção

A convecção pode ser descrita como uma forma específica de condução [10], é associada aos fluídos por pressupor a ocorrência de movimentos incompatíveis com corpos sólidos, como as variações de massa volúmica.

Através da Lei do arrefecimento de Newton é obtido o fluxo de calor por convecção, como pode ser visto na equação 2.3.

$$q_{conv} = h_c(T_1 - T_2) \quad (w / m^2) \quad (2.3)$$

Sendo h_c , a condutância térmica superficial, T_1 a temperatura da superfície e T_2 a temperatura do ambiente. Onde a condutância térmica superficial por convecção não é específica do fluído em causa, mas sim de circunstâncias específicas, como o movimento do fluído a geometria da sua superfície e a sua natureza [9]. O movimento do fluído permite que se divida a convecção em convecção natural e forçada. A primeira é referente a quando os movimentos do fluído dependem das suas características, em que as variações de massa volúmica dependem da variação de temperatura. A convecção forçada ocorre quando o movimento é exterior e independente das características mencionadas na convecção natural, um exemplo dessa situação é o caso do vento.

Na situação das fachadas envidraçadas ocorrem correntes de convecção em duas zonas diferenciadas, entre os vários panos de vidro em sistemas duplos e triplos, no espaço de separação e junto às superfícies interior e exterior [24].

2.2.3 Radiação

A radiação emitida por todos os corpos é a energia emitida através de ondas eletromagnéticas a partir de movimentos rotacionais das partículas constituintes de um corpo, onde as condições preferenciais de transmissão ocorrem quando a absorção dos corpos é reduzida.

Propagando-se à velocidade da luz a radiação possui um determinado comprimento de onda e frequência que se relacionam segundo a equação 2.4:

$$c = \lambda \times f \quad (2.4)$$

Onde λ é o comprimento de onda e f a frequência.

Em 1990 Max Planck através da sua teoria quântica formulou a equação 2.5, onde é obtida a quantidade discreta de energia, considerado que a propagação da radiação ocorre a partir do movimento de fótons e que a energia radiante é emitida descontinuamente.

$$e = h \times f = \frac{h \times c}{\lambda} \quad (2.5)$$

Sendo h a constante de Planck e c a velocidade da luz.

Podendo-se relacionar a radiação eletromagnética com a teoria de Planck, obtém-se que o comprimento de onda é inversamente proporcional à energia da radiação eletromagnética. Conclui-se que as ondas de menor comprimento são então aquelas que possuem maior energia, como o caso dos raios x e os ultravioletas que são nocivos para os seres biológicos possuindo um valor elevado de energia.

O espectro da radiação eletromagnética é muito alargado indo de menores comprimentos de onda como os raios cósmicos até maiores comprimentos como as ondas de rádio.

Na análise do comportamento de edifícios apenas uma parte do espectro é considerada, designada por radiação térmica. O comprimento de onda do intervalo varia de $0,1\mu\text{m}$ a $100\mu\text{m}$, conforme é visível na Figura 2.6, é composto pela radiação ultravioleta, radiação infravermelho, radiação visível, detetada pelo olho humano e radiação solar. Com um intervalo, de $0,1\mu\text{m}$ a $3\mu\text{m}$, a radiação solar não é representada na figura.

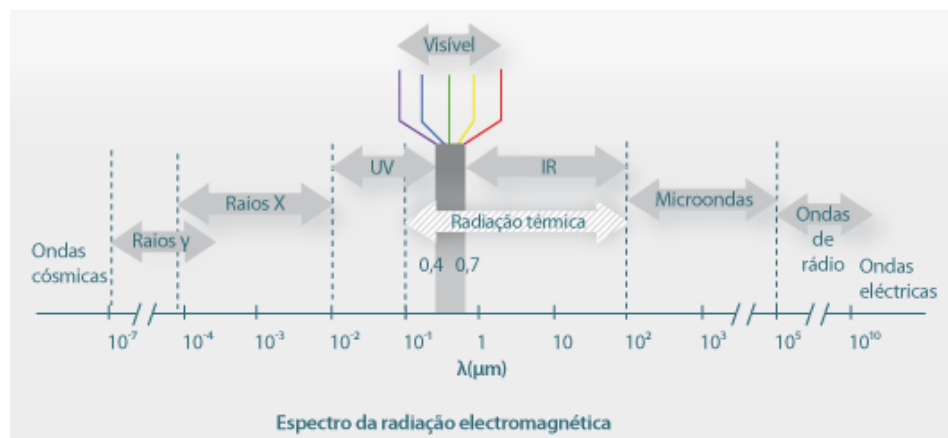


Figura 2.6: Espectro de radiação eletromagnética

Radiação de um Corpo Negro

O Corpo Negro é uma entidade teórica caracterizada por ser capaz de absorver toda a radiação nele incidente, sendo independente da direção e do comprimento de onda, emitindo a mesma quantidade de energia que a recebida por absorção, através de reflexão. Tornando-se no emissor e recetor perfeito.

A energia total emitida por um corpo é designada por poder emissivo ou radiância. Através da lei de Stefan-Boltzman é possível determinar o limite superior da radiância obtendo-se:

$$E^0 = \sigma T^4 \quad (w / m^2) \quad (2.6)$$

Sendo σ a constante de Stefan-Boltzman e T a temperatura absoluta. O valor máximo da energia emitida é corresponde à emissão de um Corpo Negro.

A capacidade de um material emitir energia é designada como emissividade, podendo também ser definida como a relação entre a radiância de um corpo e a radiância do Corpo Negro.

Devido à emissividade do corpo negro ser unitária a radiância de um corpo não negro é apenas uma percentagem da sua radiância, calculando-se da através da equação 2.7. A radiância de uma superfície (E) pode ser determinada através da conjunção das equações 2.6 e 2.7 utilizando a emissividade do corpo corrente.

$$\varepsilon = \frac{E}{E^0} \quad (2.7)$$

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (w / m^2) \quad (2.8)$$

Onde E é a radiância, E^0 é a radiância de um corpo negro e ε a emissividade.

Características das superfícies

A superfície de um corpo influencia através das suas características, o comportamento desta em relação a radiação que nela incide. Em elementos opacos a energia é tratada de duas maneiras onde uma parte da energia incidente é absorvida e outra refletida. Nos elementos envidraçados ou transparentes para além da absorção e reflexão da energia existe também parte desta que atravessará o elemento através de transmissão.

As radiações para corpos opacos e transparentes são dadas pelas equações 2.9 e 2.10 respetivamente. Onde para os corpos opacos a radiação incidente é composta pela radiação absorvida (G_a) e refletida (G_r) enquanto nos corpos transparentes, como as janelas esta é composta ainda pela radiação transmitida (G_t) sendo aquela que atravessa o corpo.

$$G_i = G_a + G_r \quad (w / m^2) \quad (2.9)$$

$$G_i = G_a + G_r + G_t \quad (w / m^2) \quad (2.10)$$

A partir dos valores de radiação incidente (G_i), absorvida (G_a), refletida (G_r) e transmitida (G_t) é possível obter o coeficiente de absorção (α), o de reflexão (ρ) e de transmissividade (τ) ou transparência. Os coeficientes relacionam-se da maneira apresentada nas equações 2.14 e 2.15 para elementos transparentes e elementos opacos.

$$\alpha = \frac{G_a}{G_i} \quad (2.11)$$

$$\rho = \frac{G_r}{G_i} \quad (2.12)$$

$$\tau = \frac{G_t}{G_i} \quad (2.13)$$

Para corpos transparentes:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.14)$$

Para corpos opacos:

$$\alpha + \rho = 1 \quad (2.15)$$

Dependentes dos materiais e das características das superfícies os parâmetros acima descritos dependem ainda do tipo de radiação incidente e do seu ângulo de incidência.

São definidos dois métodos possíveis de reflexão especular e difusa, é importante referir que por norma as superfícies correntes possuem uma reflexão intermédia entre os dois métodos mencionados.

A reflexão especular tem por base o ângulo refletido ser igual ao ângulo da radiação incidente, já a reflexão difusa assume que a radiação incidente é refletida igualmente em todas as direções [9].

2.3 Desempenho do Vidro

Para um melhor desempenho das soluções construtivas, é necessário em fase de projeto definir corretamente as características do desempenho do vidro tendo em conta a localização territorial e a orientação.

Os fatores mais relevantes que possuem uma maior influência nessa escolha são o coeficiente de transmissão térmica, o Solar Heat Gain Coefient e o Visible transmittance.

2.3.1 Coeficiente de Transmissão Térmica - U

Nas janelas a maior preocupação a nível energético no período de aquecimento é a capacidade de controlar as perdas de calor, já no período de arrefecimento é necessário controlar os ganhos para

evitar o sobreaquecimento da fração. Tal como referido anteriormente o calor transfere-se de sistemas mais quentes para os mais frios, ocorrendo do interior para o exterior de um edifício no período de aquecimento e inversamente no período de arrefecimento [10].

A capacidade de uma janela resistir à transferência de calor é referida como o seu valor de coeficiente de transmissão térmica. Este é definido a partir da resistência térmica total (R) sendo dada pela equação 2.16.

$$U = \frac{1}{R} \quad (w / m^2 \text{ } ^\circ C) \quad (2.16)$$

A resistência térmica total é a soma das várias resistências individuais de cada material constituinte, mais as resistências superficiais interior e exterior do elemento, estando estas definidas para elementos verticais e horizontais. Um valor de resistência térmica elevado corresponde a uma solução mais eficiente pois, as transferências de calor são menores o que leva à obtenção de um valor de U reduzido, diminuindo a quantidade de perdas e ganhos por m² de superfície [9].

Janelas com menores valores de U correspondem então soluções melhores a nível de controlo térmico por diminuírem as transferências de calor reduzindo o impacto produzido nas necessidades de aquecimento e arrefecimento.

Para a obtenção do valor total do coeficiente transmissão térmica de um sistema de vão envidraçado, é necessário a definição do tipo de caixilharia, do vidro utilizado e das respetivas áreas. O coeficiente pode ser determinado através da seguinte expressão [11]:

$$U = \frac{A_c \times U_c + A_v \times U_v + L_v \times \Psi}{A_c + A_v} \quad (w / m^2 \text{ } ^\circ C) \quad (2.17)$$

Onde A_c e U_c são a área e o coeficiente de transmissão térmica respetivamente, A_v e U_v são a área e coeficiente de transmissão térmica para o vidro, L_v é o calor latente de evaporação e Ψ o coeficiente linear do caixilho.

2.3.2 Fator Solar– g_L

O fator solar é um coeficiente unitário em percentagem que representa a quantidade de energia incidente que atravessa o vidro direta e indiretamente. Possuindo a maior percentagem no valor total para um vidro simples comum.

A energia direta é a energia que é transmitida, enquanto a indireta é a fração de energia solar incidente no vidro que é absorvida sendo posteriormente transmitida por convecção para o interior. É preciso ter em conta que alguns efeitos das transferências de calor são relacionados com o coeficiente de transmissão térmica da janela.

O valor do fator é afetado pelo sistema utilizado desde simples duplo e triplo às características dos vários vidros utilizados. Os valores podem variar desde superior ou 80%, para vidro simples, até 20% ou menor para vidros com características que reduzam a transmissão de calor por radiação [10].

O *Solar Heat Gain Coefficient* (SHGC) veio de certa forma substituir o *Shading Coefficient* (SC), ou fator solar (g_{\perp}) por considerar todo o sistema da janela enquanto o fator solar apenas considera a radiação solar incidente no vidro desconsiderando todo o sistema envolvente. [10]

O fator solar é calculado usando a seguinte equação 2.18 [12]:

$$g_{\perp} = \frac{\text{Ganho solar através do vidro}}{\text{Radiação Incidente}} \quad (2.18)$$

Assim, é obtida a percentagem de energia solar que atravessa o envidraçado e posteriormente transmitida para o interior do edifício. O fator solar é ainda dependente da orientação e do ângulo de incidência da radiação solar [13]. Para uma conversão aproximada de g_{\perp} (ou SC) para SHGC, multiplica-se o valor obtido pela equação 2.18 por 0.87 [10].

2.3.3 Transmissão Luminosa– Tv

Coeficiente de transmissão luminosa (tv) ou Visible Transmittance (VT) é a quantidade de luz no espectro de radiação térmica da luz visível que passa pelo sistema de envidraçado. Tal como o fator solar, o Tv é um coeficiente unitário em percentagem. Um valor elevado de Tv traduz-se numa maior quantidade de luz solar no espaço incidente podendo diminuir a iluminação ativa, reduzindo por associação a necessidade de arrefecimento.

O valor do coeficiente é dependente do tipo de sistema e vidros utilizados podendo variar entre os 90% ou superior para vidro simples e atingir valores de 10% ou menores para vidros com revestimentos de elevada refletividade e vidros de cor [10] [12].

Inicialmente na evolução dos sistemas redutores de transmissão de calor como low-e e camadas refletivas os sistemas diminuía o coeficiente do fator solar e por associação o valor de Tv. Hoje em dia já existem soluções que reduzem o calor transmitido sem afetar consideravelmente a quantidade de luz que passa no envidraçado.

2.4 Energyplus

O EnergyPlus é um programa de simulação desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos que permite analisar o comportamento e desempenho energético dos edifícios. Existente desde 1996, o programa encontra-se agora na versão 8.7.0, lançada em março de 2017. É uma ferramenta gratuita e operacional em qualquer sistema operativo disponível, tendo sido desenvolvido a partir de programas já existentes como o DOE-2 e o Blast. [14]

O software tem como função principal o cálculo da carga térmica e a análise energética de um edifício. Através da definição de um modelo, a partir de parâmetros estipulados pelo utilizador, o programa permite a análise do consumo energético desde o aquecimento e arrefecimento, fluxos de calor, ventilação, iluminação e uso de água [15].

Através dos dados inseridos é possível obter análises detalhadas dos critérios seleccionados em intervalos de tempo como horas, dias, semanas ou meses ficando essa definição ao critério do utilizador. O programa tem ainda a vantagem de poder obter resultados com frequências inferiores a uma hora, sendo o mínimo recomendando dez minutos para a obtenção de simulações mais precisas, correspondendo a seis timesteps por hora [16].

O EnergyPlus é de utilização simples disponibilizando documentos e ferramentas que possibilitem a sua fácil compreensão. Permite modelar os sistemas que se pretende estudar, obtendo simulações detalhadas e rigorosas. O programa é composto por vários componentes que ajudam a criar e a correr as simulações obtendo resultados em texto. Os componentes utilizados no presente documento são o IDF Editor e o EP-Launch.

Onde o IDF Editor (*Input Data File*) consiste num sistema de introdução de dados, que permite criar e editar modelos, conectando dentro dos mesmos a informação através de objetos que se relacionem. Os seus resultados (Outputs) permitem uma leitura simples e são acompanhados de comentários que possam ser úteis para a compreensão da informação. Ainda possui a vantagem de converter as unidades standard para unidades SI.

O EP-Launch é um sistema de utilização mais simples, permite ao utilizador através da gestão de introdução de dados e resultados simular os modelos criados. Permite ainda a conjugação dos modelos em análise com ficheiros climáticos, simplificando a introdução do clima nos ficheiros em simulação.

Após as simulações concluídas o programa fornece, através de um ficheiro possíveis erros, a razão e onde estes se encontram. Os erros são divididos em três categorias, consoante a gravidade de cada um: [17]

- **Warning** – Resolver se aplicável, não é um erro que comprometa a simulação sendo um erro de menor gravidade;
- **Severe** – Deve ser resolvido, pois compromete a simulação, podendo alterar os resultados obtidos, tornando os seus valores inválidos;
- **Fatal** – O programa deixa de correr se tal erro se der, resultada da conjugação dos dois tipos de erros acima mencionados.

A simulação pode ainda fornecer um documento de visualização de AUTOCAD do modelo em análise se no documento de idf esse output for requerido. Permitindo uma visão tridimensional do modelo em estudo.

No capítulo 3 serão mencionadas as considerações efetuadas na inserção de dados no programa, especificando mais detalhadamente as metodologias mais relevantes para o desenvolver do estudo. Na Tabela 2.1 é possível observar um esquema representativo de alguns dos Inputs e Outputs utilizados para a realização da presente dissertação.

Tabela 2.1: Esquema representativo de dados de Input e Output do programa EnergyPlus

| INPUT | OUTPUT |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> -Zonas Térmicas; -Zonas Climáticas; -Período de Simulação -Geometria da fração; -Materiais Constituintes; -Ganhos Internos (Pessoas, Equipamento, Iluminação); -Ventilação -HVAC -Temperaturas Interiores (Aquecimento e Arrefecimento); | <ul style="list-style-type: none"> - Temperaturas Exteriores e Interiores - Fluxos de calor -Necessidades de Energia para Aquecimento -Necessidades de Energia para Arrefecimento - Ganhos e Perdas de Calor pelos vãos envidraçados -Horas de desconforto térmico |

2.4.1 Conforto térmico segundo ASHRAE

Na análise do conforto térmico interior o programa do EnergyPlus utiliza os parâmetros fundamentais aplicados pela *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* através da utilização do documento ASHRAE 55-2010 *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*.

A análise efetuada no programa consiste em pegar na metodologia definida pelo ASHRAE e aplica-la aos horários e ocupação criados nas várias simulações consideradas fatores como o metabolismo, quantidade de vestuário, temperatura do ar, temperatura radiante, velocidade do ar e humidade [18].

O programa assume então uma percentagem de roupa que varia entre 0.5 e 1 considerando que os utilizadores se encontram com roupa leve, ou um mínimo de roupa aceitável para cada período do ano, para que os valores sejam conservativos. Utiliza ainda os horários de atividade dos utilizadores conjugando os dois parâmetros para que com as características de cada simulação se obtenha um valor do conforto térmico interior. É necessário segundo a metodologia de ASHRAE garantir no mínimo um valor de 80% de tempo de conforto habitacional podendo utilizar-se uma percentagem de 90% quando se pretende obter soluções de maior conforto térmico [18].

A Figura 2.7 é representativa da relação existente entre a temperatura exterior e interior bem como os níveis de aceitabilidade se relacionam com estes fatores para situações de melhores condições térmicas. Há que considerar que o EnergyPlus produz os valores em horas tendo em conta os conceitos essenciais do ASHRAE pelo que aceitabilidade de 80% e 90% deve ser mantida na avaliação horária do conforto.

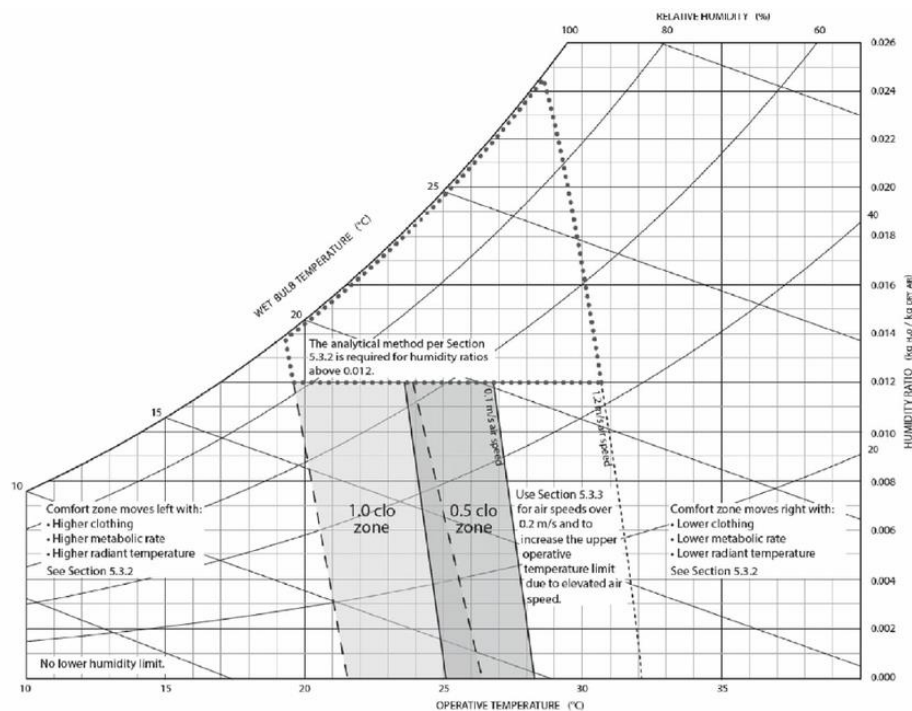


Figura 2.7: Temperatura de referência para espaços condicionados [18]

2.5 Análise do Custo de Ciclo de Vida

A análise do custo de ciclo de vida é um método de avaliação que permite através da conjunção das necessidades energéticas e o custo encontrar uma solução que garanta as exigências mínimas habitacionais que seja a mais vantajosa a nível monetário criando uma análise do tipo custo-benefício. Tal cenário é possível pois não são apenas tidos em conta os investimentos iniciais, todos os valores associados como os custos de manutenção funcionamento e de remoção, caso estes últimos sejam aplicáveis, durante o período de ciclo de vida estimado são uma parcela a considerar no cálculo da solução ótima.

A Diretiva EPDB (recast) veio impor um método de avaliação para que todos os estados membros possuíssem linhas guia de como deveria ser efetuada a avaliação e que parâmetros deveriam ser considerados. Assim, foi criado o regulamento no 244/2012 que vem completar a diretiva onde é estabelecida uma metodologia para o cálculo de custo ótimo para soluções de menor necessidades energéticas que correspondam ao nível ótimo de rentabilidade.

O método de cálculo escolhido não vem beneficiar nenhum sistema de soluções sendo considerado neutro assegurando uma análise competitiva entre as várias propostas para o tempo considerado como o tempo de vida útil [19].

Todas as medidas novas ou existentes de eficiência energética devem ser colocadas como parâmetros para análise do custo, possuindo um impacto direto ou indireto que afeta a performance do edifício.

Os estados membros podem ainda adaptar o método de cálculo apresentado pelo regulamento desde que este seja equivalente à metodologia proposta e que esteja de acordo com o artigo 3 e 4 e, anexo I presentes na Diretiva 2010/31/EU. São impostas condições para a metodologia, através da consideração de alguns aspetos como as características térmicas reais do edifício, os sistemas de ventilação, a iluminação fixa as cargas internas, as condições climáticas e orientação, as proteções solares. É ainda necessário considerar os efeitos positivos como o da exposição solar e iluminação natural. Para o efeito de cálculo é necessário também a classificação correta do tipo de edifício através da sua função [1].

A regulamentação [19] também apresenta para auxílio ao cálculo tabelas representativas com os fatores a considerar em cada uma das componentes. No caso dos edifícios de referência é necessário para cada estado membro apresentar através do formato exibido, numa das tabelas disponíveis, as características dos vários tipos de edifício, tendo em conta a sua função com base no registo mais comum de construção de cada estado.

É referido ainda que os estados membros devem reportar valores obtidos das suas análises efetuadas de forma a se possuir uma base de dados onde se analisa o progresso que cada estado membro obtém para atingir os requerimentos exigidos na obtenção do custo ótimo para um valor mínimo de necessidades energéticas [19].

No terceiro capítulo será apresentado em maior detalhe a metodologia utilizada para o cálculo do custo ótimo, bem como todas as considerações tomadas que estejam de acordo com os termos impostas pela Diretiva e documento complementar.

3 Metodologia

O presente capítulo apresenta o modelo em estudo, especificando os parâmetros essenciais para a definição da solução base e como estes se alteram ao longo das simulações efetuadas. A metodologia utilizada no programa de análise, EnergyPlus, será exposta ao longo do capítulo, evidenciando os critérios mais importantes para a correta definição do modelo. Será também abordada a análise do custo de ciclo de vida utilizada.

Seguidamente apresentam-se as considerações para a elaboração e análise do modelo.

3.1 Caracterização da fração

Como base de modelação de um edifício, optou-se por utilizar um projeto de arquitetura existente para o estudo da presente dissertação.

A fração em análise encontra-se inserida num edifício destinado à habitação com quatro apartamentos, um por piso. É possível observar pela Figura 3.1 a orientação das fachadas, sendo que as áreas com maior superfície de janelas encontram-se a Norte e a Sul.

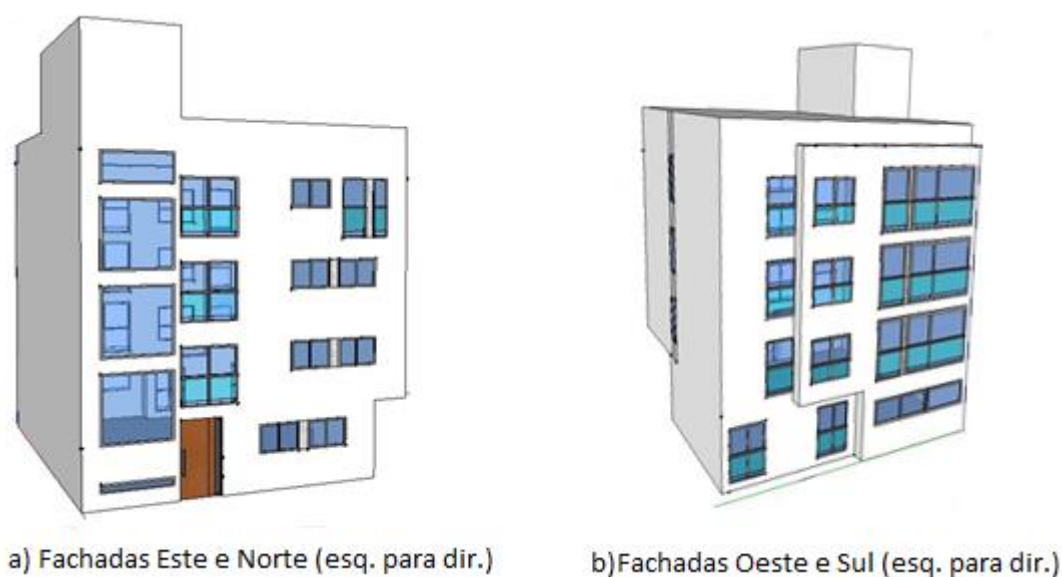


Figura 3.1: Fachadas do edifício

Para o modelo de análise foi selecionado o terceiro piso que possui uma área útil de 135,49m², efetuando uma análise onde a fração não se encontre em contacto com o solo. Optou-se ainda pelo terceiro piso por ser um piso intermédio, representante do comportamento no edifício por piso. A fração em análise possui três quartos, uma suite, uma instalação sanitária, uma cozinha e uma sala (Figura 3.2). Refira-se que a fração original sofreu algumas alterações estruturais, por forma a facilitar a introdução do modelo no programa EnergyPlus, de modo a obter um modelo de formato mais simples.

As alterações foram a remoção do poço do elevador junto as escadas, na zona comum e o alinhamento de paredes interiores.

O modelo foi inserido através de coordenadas cartesianas, usando a metodologia da linha média, onde as coordenadas são retiradas a partir do centro do elemento construtivo, por forma a não acrescer em demasia a altura e a área útil da fração. A inserção das coordenadas foi efetuada no menu *Thermal Zones and Surfaces*, mais especificamente no objeto *BuildingSurface:Detailed*, introduzidas no sentido contrário aos ponteiros do relógio, iniciando no canto inferior esquerdo. As características de introdução de coordenadas foram definidas no objeto *GlobalGeometryRules* pertencente ao menu anteriormente referido.

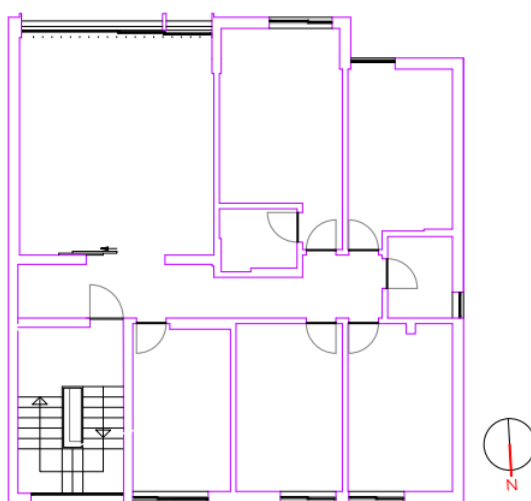


Figura 3.2: Fração em estudo

A fração encontra-se localizada em Lisboa e será analisada também, no decorrer do documento, nas regiões de Coimbra e Bragança, por forma a obter resultados e comparações do comportamento dos sistemas em zonas do país com distintas condições climáticas. Optou-se por selecionar as regiões, por representarem as três zonas climáticas distintas em Portugal, no período de Inverno, segundo o REH [13]. A escolha específica das regiões de Lisboa, Coimbra e Bragança foi efetuada com base nas regiões com informações climáticas disponíveis no Energyplus.

3.2 Zonas Térmicas

Para uma análise mais detalhada do comportamento da fração e influência dos vãos envidraçados, foram definidas duas zonas térmicas distintas, separando as fachadas envidraçadas a Sul e Oeste, onde se espera um maior valor de ganhos solares, da fachada Norte. É ainda constituída uma zona térmica adicional que define o espaço comum do edifício.

A criação das zonas dentro do espaço habitacional permite uma melhor compreensão dos efeitos da exposição nas necessidades energéticas e no conforto térmico interior. A definição das zonas foi

efetuada no objeto *Zone*, inserido no menu *Thermal Zones and Surfaces*, complementado pelo objeto *BuildingSurface:Detailed* onde são identificados os elementos individuais e de fronteira entre as zonas.

Conforme pode ser visualizado na Figura 3.3, a exposição solar no caso do clima em Portugal é mais favorável num período de aquecimento em fachadas localizadas a Sul. No período de arrefecimento, devido a uma altura mais elevada do sol, são maioritariamente as fachadas a Este e Oeste as que captam mais ganhos solares, sendo essas as fachadas mais desfavoráveis durante esse período.

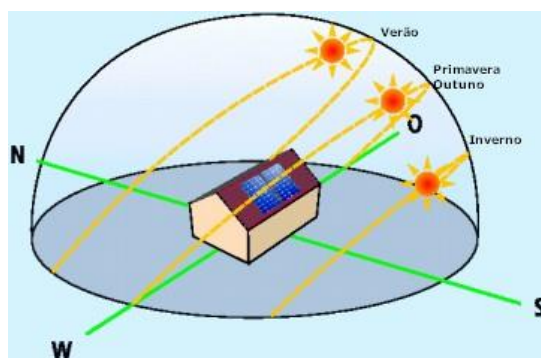


Figura 3.3: Exposição Solar nas fachadas para várias estações [20]

Na Tabela 3.1 são indicadas as divisões de acordo com a zona. A Figura 3.4 mostra a disposição e separação das zonas térmicas referidas. A zona 1 possui uma área de 42,28 m² e a zona 2, de maiores dimensões, possui uma área de 93,21 m².

Tabela 3.1: Definição de Zonas Térmicas

| Zona térmica | |
|--------------|----------------|
| Zona 1 | Quarto 1 (Q.1) |
| | Quarto 2 (Q.2) |
| | Cozinha (Cz) |
| Zona 2 | Hall (H) |
| | Quarto 3(Q.3) |
| | Quarto 4(Q.4) |
| | I.S.1 |
| | I.S.2 |
| | Sala (S) |

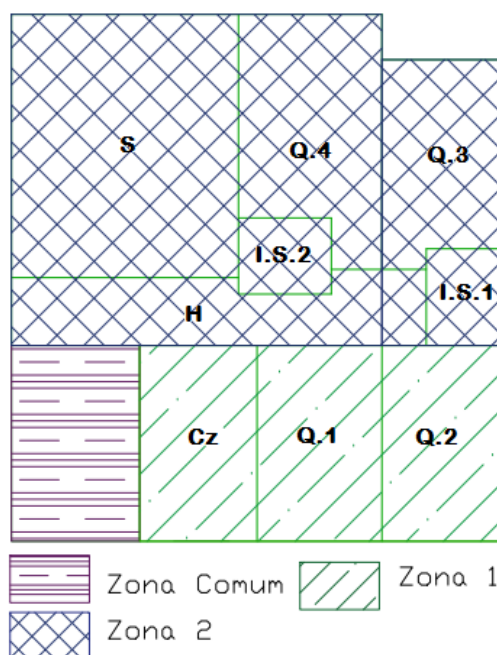


Figura 3.4: Zonas térmicas

3.3 Caracterização Climática

Os valores das zonas climáticas utilizados nas simulações foram obtidos a partir da página oficial do programa EnergyPlus [21]. Os ficheiros climáticos referentes a Portugal foram disponibilizados pelo Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI) (atual Laboratório nacional de Energia e Geologia - LNEG).

Para o presente estudo são analisadas três zonas climáticas, Lisboa, Coimbra e Bragança, selecionadas por representarem as três zonas climáticas de Inverno em Portugal [13]. Optou-se por selecionar as zonas tendo em consideração o período de Inverno pois, este por norma traduz-se em valores superiores de necessidades energética, podendo obter análises mais distintas entre as várias regiões.

Na tabela 3.2 encontram-se os valores referentes à altitude média e graus dias de cada uma das regiões consideradas, valores retirados do EnergyPlus e REH, respetivamente.

Tabela 3.2: Valores de referência referentes às zonas em estudo [13]

| | Lisboa | Coimbra | Bragança |
|-----------------------------|--------|---------|----------|
| Altitude (m) | 71 | 140 | 692 |
| Graus Dias (GD) (°C) | 1071 | 1304 | 2015 |

A utilização dos ficheiros climáticos torna a definição do clima mais simples no programa, sendo apenas necessário introduzir no objeto *Site:GroundTemperature:BuildingSurface* as temperaturas médias de cada mês. A restante informação climática é utilizada através de um ficheiro *epw* inserido no programa EP-Launch correndo o ficheiro climático com as simulações previamente definidas no IDF-Editor.

3.3.1 Temperatura Exterior

Na Figura 3.5 é apresentada a evolução anual das temperaturas médias diárias de Lisboa, Coimbra e Bragança. Das três regiões apresentadas na figura é possível observar que Lisboa é a região que possui uma variação de temperatura mais constante, não existindo picos de temperatura demasiado distantes dos remanescentes valores, o máximo e mínimo para a região sendo de 26,1°C e de 6,8°C, respetivamente. Já para as regiões de Coimbra e Bragança ocorrem picos mais acentuados de diferença de temperaturas. Enquanto Coimbra possui valores próximos de Lisboa, Bragança apresenta no período de inverno valores menores, devido a sua localização geográfica. Os picos para ambas as regiões são de 29,3°C e de 3,9°C para Coimbra e de 29°C e – 1.9°C para a zona de Bragança.

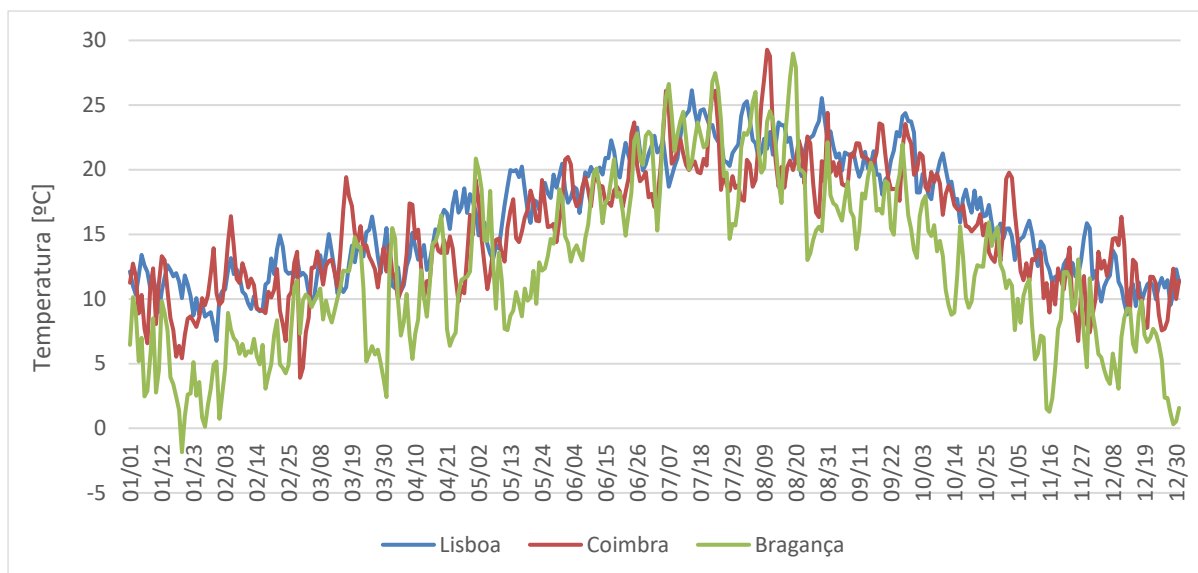


Figura 3.5: Temperatura exterior - Zonas Climáticas

3.3.2 Temperatura Interior

Para a temperatura interior, de ambas as zonas dentro da fração foi imposto um valor de mínimo de 20°C e um valor máximo de 25°C para a estação de aquecimento e arrefecimento, respetivamente. Apesar de o REH [13] indicar um mínimo de 18°C, optou-se por aumentar o valor menor de forma a melhorar o conforto habitacional no período de Inverno e por ser um valor comum em estudos semelhantes [27] [28] usando EnergyPlus como programa de modelação.

3.4 Soluções Construtivas – Caso base

Na definição das soluções construtivas opacas optou-se por utilizar como base as construções típicas portuguesas (Figura 3.6). Devido ao presente trabalho se destinar à análise de soluções de envidraçado, os modelos presentes na Tabela 3.3 mantêm-se constantes ao longo de todas as simulações efetuadas. A construção base que se optou por seguir foi a última dos anos 80 compostas por duas fieiras de alvenaria e um caixa de ar com isolamento térmico pelo interior.

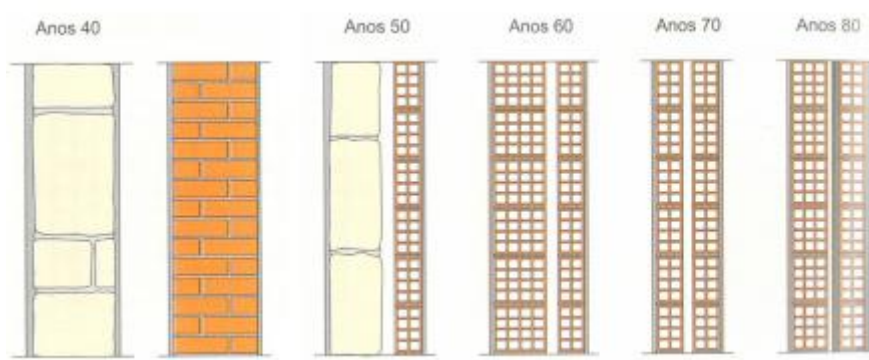


Figura 3.6: Evolução do Sistema de Paredes em Portugal [4]

As várias soluções construtivas foram introduzidas no EnergyPlus, no objeto *Construction* após a definição de cada material constituinte, no objeto *Material* sendo ambos os campos pertencentes ao Menu *Surface Construction Elements*. Os elementos foram definidos e colocados do exterior para o interior da fração, segundo a metodologia do programa. A introdução das várias soluções de envidraçado será efetuada através de uma metodologia semelhante, referida posteriormente.

Não foi considerada a existência de pontes térmicas. Utilizou-se superfícies homogêneas pois, o programa não apresenta uma metodologia específica de análise associada a pontes térmicas e à determinação das suas perdas energéticas.

Não foi colocado isolamento térmico no pavimento e no teto pois considerou-se que ambas as habitações superior e inferior, sendo zonas aquecidas, encontram-se à mesma temperatura que a fração em estudo, pelo que não há transferências de calor por ambos os elementos. Em conformidade no EnergyPlus ambos os elementos foram definidos como *Adiabatic*.³

Tabela 3.3: Materiais dos elementos opacos e os seus coeficientes de transmissão térmica [22]

| | Material | e (m) | λ W/m Cº) | R (m²Cº/W) | Rsi (m²Cº/W) | Rse (m²Cº/W) | Rt (m²Cº/W) | U (W/m²Cº) |
|-----------------------------------|-------------|----------|----------------------|---------------|-----------------|-----------------|----------------|---------------|
| Parede Exterior | Reboco | 0,02 | 1,3 | 0,015 | 0,13 | 0,04 | 1,85 | 0,54 |
| | Alvenaria | 0,15 | - | 0,390 | | | | |
| | Caixa de ar | 0,03 | - | 0,180 | | | | |
| | XPS | 0,03 | 0,037 | 0,811 | | | | |
| | Alvenaria | 0,11 | - | 0,270 | | | | |
| | reboco | 0,02 | 1,3 | 0,015 | | | | |
| Pavimento e Teto | Reboco | 0,02 | 1,3 | 0,015 | 0,10 | 0,04 | 0,39 | 2,57 |
| | Betão | 0,2 | 2 | 0,100 | 0,17 | | 0,46 | 2,18 |
| | Parquet | 0,02 | 0,15 | 0,133 | | | | |
| Parede Interior | Reboco | 0,02 | 1,3 | 0,015 | 0,13 | 0,04 | 0,47 | 2,12 |
| | alvenaria | 0,11 | - | 0,270 | | | | |
| | Reboco | 0,02 | 1,3 | 0,015 | | | | |
| Parede em contacto com Zona comum | Reboco | 0,02 | 1,3 | 0,015 | 0,13 | 0,04 | 1,53 | 0,65 |
| | Alvenaria | 0,2 | - | 0,520 | | | | |
| | XPS | 0,03 | 0,037 | 0,811 | | | | |
| | Reboco | 0,02 | 1,3 | 0,015 | | | | |
| Portas | Porta | 0,05 | 0,23 | 0,217 | 0,13 | 0,04 | 0,39 | 2,58 |

³ Quando as temperaturas são consideradas iguais, nos dois ambientes separados pelo elemento construtivo o que leva a que o fluxo de calor seja zero, não existindo transferências de calor.





Os elementos horizontais possuem dois coeficientes de transmissão térmica distintos pois, a resistência térmica superficial interior possui valores para fluxos de calor ascendentes e fluxos de calor descendentes, sendo os valores respetivamente de 0,10 e 0,17 [22]. O fluxo de calor descendente é típico da estação de arrefecimento onde está mais calor fora da habitação enquanto ocorre o inverso na estação de aquecimento em que a temperatura interior é superior a exterior dando origem a um fluxo ascendente. Os valores das resistências e condutibilidades térmicas foram retirados do ITE50.

3.5 Área envidraçada

Foi decidido analisar a influência que as diferentes áreas das soluções de envidraçado produzem na fração em análise com objetivo de observar como esta percentagem influencia as necessidades de aquecimento e arrefecimento, os ganhos e perdas térmicas e o conforto térmico.

Na Tabela 3.4 é possível observar a relação janela/parede da situação base de análise, em que cerca de 25% da área da parede possui envidraçados. Como é possível analisar a maioria da área de janelas encontra-se na fachada a Sul ocupando 60% da área total da fachada. Optou-se ainda por criar mais duas situações de análise sendo uma com maior área de envidraçado, de 30% e outra de 15%, possuindo a menor área de envidraçado. Obtendo resultados para o impacto que áreas maiores ou menores de vidro produzem no consumo energético de uma habitação.

Tabela 3.4: Relação Janela/parede da solução base

| | Total |  |  |  |  |
|-----------------------------|--------|---|--|---|---|
| Área de Parede (m²) | 116,86 | 24,9 | 22,53 | 33,6 | 35,84 |
| Área de Janela (m²) | 31,16 | 9,01 | 0 | 20,4 | 1,76 |
| Relação Janela - Parede (%) | 25,56 | 36,19 | 0 | 60,71 | 4,9 |

3.6 Ganhos Internos

Os ganhos Internos correspondentes ao calor produzido por iluminação, ocupantes e diferentes tipos de equipamento são por norma significativos no balanço energético da zona térmica. O EnergyPlus permite especificar os ganhos energéticos para cada um dos componentes considerados. O valor total de ganhos internos é compreendido por ganhos de convecção, de radiação e condução. Os ganhos por convecção afetam diretamente a temperatura da zona. Já por sua vez os ganhos por radiação são distribuídos pelas superfícies do espaço envolvente sendo inicialmente absorvidos, onde parte se transforma em ganhos de condução, e seguidamente refletidos em menores quantidades de volta para a zona [16].

No presente documento foram considerados como ganhos internos a ocupação dos habitantes, a iluminação e os equipamentos elétricos. É importante referir que o objetivo principal do trabalho não é apenas avaliar os valores de necessidades energéticas obtidas, mas sim a comparação entre as várias soluções analisadas, pelo que se manteve os mesmos padrões de ganhos internos para todas as hipóteses consideradas. Para que os valores não se afastem dos valores definidos pelo REH, a iluminação e os equipamentos assumem um valor cada de 1,5 W/m².

Os horários foram efetuados considerando percentagens, sendo definidos no objeto *Schedule:Compact* contido no Menu *Schedules* do programa.

3.6.1 Ocupação

A ocupação da fração é determinada através da expressão $n+1$, em que n representa o número de quartos existentes, originando uma família de cinco elementos para o modelo em estudo. Na elaboração do perfil de ocupação seguiu-se os seguintes pressupostos:

- A iluminação só está ativa na presença de elementos na fração;
- A cozinha e sala podem ser usadas por todos as pessoas ao mesmo tempo;
- Cada habitante apenas frequenta o seu quarto;
- O hall é considerado apenas uma zona de circulação;

As rotinas ocupacionais foram obtidas a partir da análise de uma família com três jovens em idade escolar e um casal com trabalho a full-time, sendo de seguida adaptada para o modelo computacional.

Foi considerada a alteração dos hábitos ocupacionais entre os dias úteis e restantes (fins de semana/feriados) por forma a apresentar uma situação mais próxima da realidade dos habitantes, obtendo-se dois perfis de ocupação distintos. Na Figura 3.7 é possível observar o padrão de ocupação para os dias úteis, para ambas as zonas, existindo picos de maior ocupação no período da manhã (0h às 07h) e no fim do dia (18h às 24h). Já na Figura 3.8, o nível de ocupação apresenta uma situação mais uniforme.

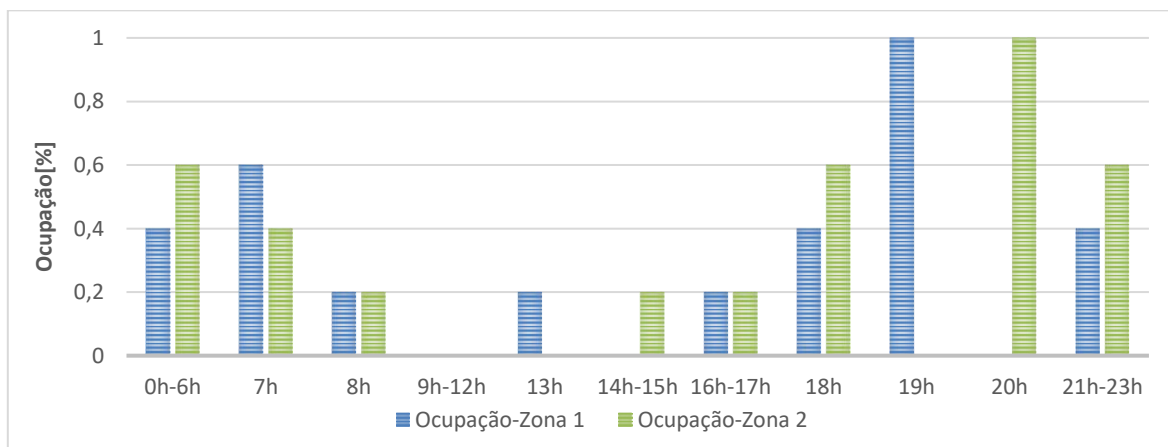


Figura 3.7: Gráfico Padrão de Ocupação-Dias úteis

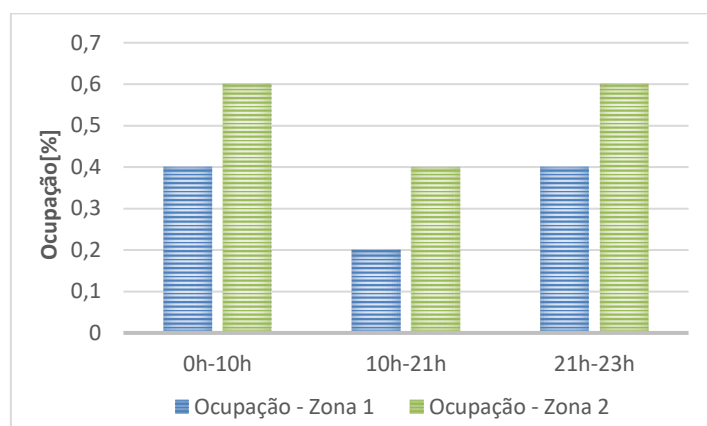


Figura 3.8: Gráfico Padrão de Ocupação - Restantes Dias

Para além dos hábitos ocupacionais é necessário considerar-se a produção de energia associada aos habitantes e a cada atividade desempenhada. Para tal, é utilizada a tabela disposta no documento *EnergyPlus, Input Output Reference*. Na Tabela 3.5 apresenta-se valores utilizados na construção do perfil de atividades que complementa os hábitos ocupacionais.

Tabela 3.5: Energia por pessoa e m^2 para cada atividade [16]

| Atividade | W/Pessoa | W/ m^2 |
|-------------------------|-----------|-----------|
| Dormir | 72 | 40 |
| Permanecer sentado | 108 | 60 |
| Ler Sentado | 99 | 55 |
| Trabalhar no computador | 117 | 65 |
| Cozinhar | 171 a 207 | 95 a 115 |
| Limpezas | 207 a 360 | 115 a 200 |

3.6.2 Iluminação

A definição padrão da iluminação é efetuada tendo por base o perfil de ocupação de habitantes e o período de exposição solar. Foi definido um valor de $1,5 W/m^2$ para ambas as zonas térmicas, definindo-se uma percentagem de iluminação para cada compartimento. A percentagem de cada espaço foi obtida através da divisão de 1, valor correspondente a toda a iluminação ativa por zona, pelo número existente de divisões em cada zona térmica.

No programa EnergyPlus é possível definir o tipo de iluminação existente em cada espaço da fração. Na Figura 3.9 é possível observar alguns dos tipos de iluminação propostos pelo programa. Por forma a simplificar optou-se por colocar uma luz suspensa em cada uma das divisões.

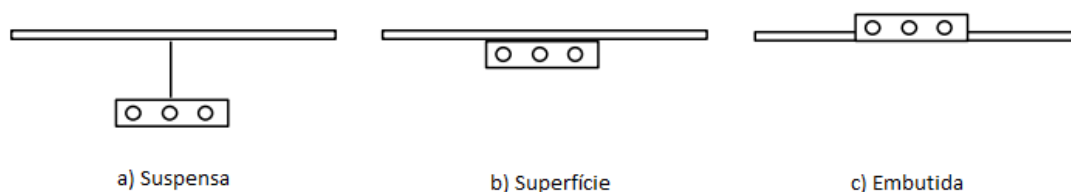


Figura 3.9: Tipo de Iluminação (imagem adaptada de [16])

Ao definir o sistema de iluminação no programa é necessário a colocação de três campos dependentes do tipo de iluminação existente. As suas variáveis são:

- Fração de retorno de ar

É a fração de calor da iluminação que passa pelo nó de saída em contacto com outras zonas térmicas. No presente modelo os únicos pontos de ligação entre zonas são as portas pelo que a variável toma sempre o valor de zero.

- Fração radiante

Define-se pela fração de calor da iluminação que é transmitida para a zona como ondas-longas. O programa calcula a quantidade de radiação que é absorvida pelas superfícies interiores, de acordo com a área vezes o produto do coeficiente de absorção térmica dos materiais constituintes do elemento construtivo.

- Fração visível

É definida como a fração de calor da iluminação que é transmitida para a zona através de ondas-curtas. O programa calcula tal como para a fração radiante a quantidade de radiação que é absorvida pelas superfícies interiores a partir do produto do fator solar dos constituintes do elemento vezes a área. [16]

A soma dos três valores não deverá exceder o valor de 1. Para o modelo em estudo encontram-se, na Tabela 3.6 os valores referentes adotados para o tipo de iluminação suspensa.

Tabela 3.6: Valores aproximados de fração de retorno de ar, fração radiante e fração visível [16]

| Tipo de Iluminação | Suspensa | Superfície | Embutida |
|-------------------------|----------|------------|----------|
| Fração de retorno de ar | 0 | 0 | 0 |
| Fração radiante | 0,42 | 0,72 | 0,37 |
| Fração visível | 0,18 | 0,18 | 0,18 |

Nas Figura 3.10 e Figura 3.11 apresentam-se os perfis de iluminação para os dias úteis e para os dias restantes (fins de semana/feriados). Os maiores picos de utilização são semelhantes aos de ocupação

devido à iluminação depender da presença dos ocupantes, sendo nula em períodos de descanso, de desocupação e de presença de luz solar suficiente.

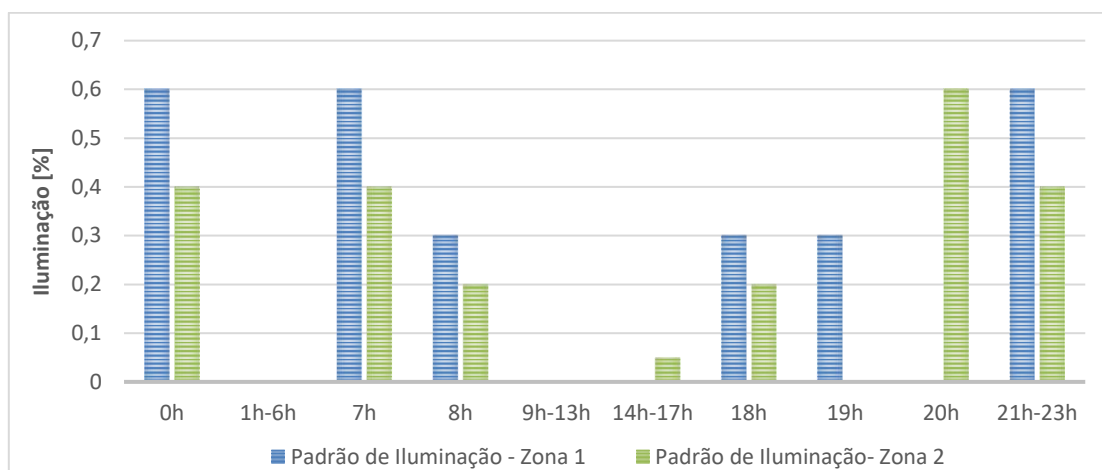


Figura 3.10: Gráfico Padrão de Iluminação-Dias úteis

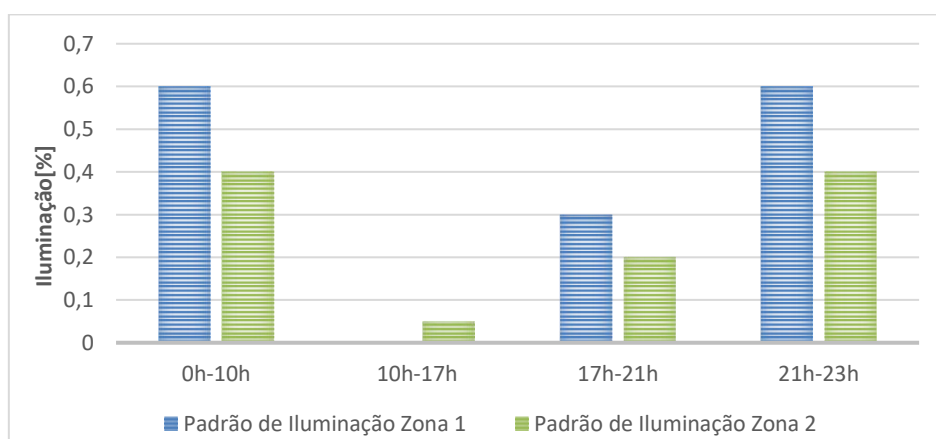


Figura 3.11: Gráfico Padrão de Iluminação – Restantes dias

3.6.3 Equipamentos

Como efetuado no perfil de iluminação, também o padrão de utilização de equipamentos depende dos hábitos ocupacionais dos elementos. É elaborado tomando os seguintes pressupostos:

- O hall de entrada não possui qualquer equipamento;
- As instalações sanitárias apenas representam 10% da utilização de equipamentos na zona 2;
- A cozinha representa 20% da utilização de equipamentos na Zona 1;
- Os equipamentos encontram-se em funcionamento na presença de habitantes na fração exceto, no período de descanso 1h-7h, para situação de dias úteis e, 1h-10h nos restantes dias;

À semelhança dos ganhos internos de iluminação é utilizado um valor de 1,5 W/m² para cada uma das zonas térmicas, assumindo uma percentagem de consumo por divisão. Nas Figura 3.12 e Figura 3.13 é possível analisar os gráficos referentes aos dias úteis e dias restantes (fins de semana/feriados), respetivamente.

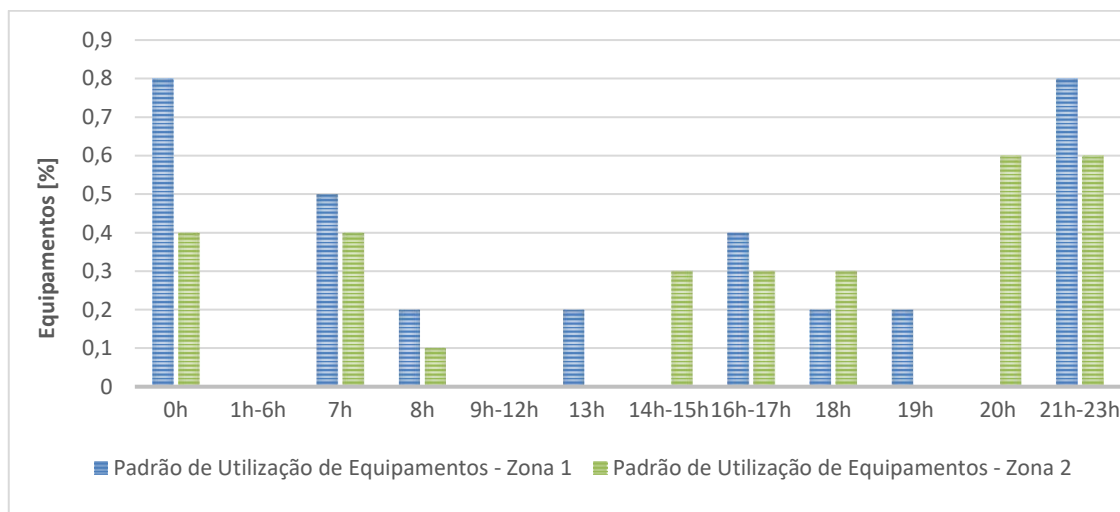


Figura 3.12: Gráfico padrão de Equipamentos- Dias úteis

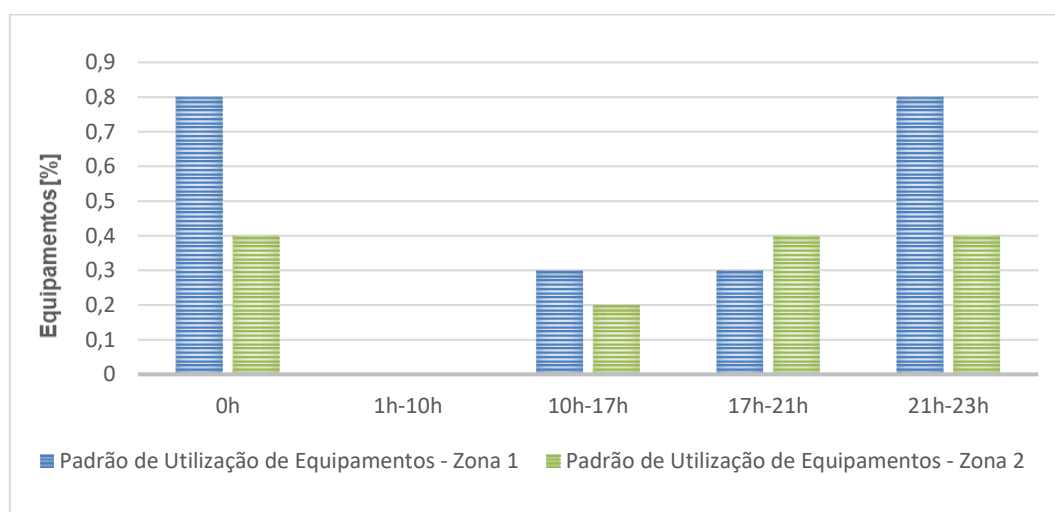


Figura 3.13: Gráfico padrão de Equipamentos – Restantes dias

3.7 Ventilação

Uma importante característica de consumo de energia em edifícios é o fluxo de ar entre zonas e o fluxo de ar relativo à ventilação natural. Para o modelo em estudo foi definido, através dos objetos *ZoneInfiltration:DesignFlowRate* e *ZoneCrossMixing*, pertencentes ao menu *Zone Air Flow*, a circulação do ar da envolvente exterior para a fração e a circulação do ar entre Zonas, respetivamente.

3.7.1 Ventilação por Infiltração

A ventilação por infiltração ocorre do exterior para o interior através de portas exteriores, de frestas na envolvente do envidraçado e uma quantidade muito reduzida pelos elementos construtivos. Para a determinação da infiltração o EnergyPlus utiliza a seguinte fórmula:

$$Infiltração = I_{design} * F_{Schedule} + (A + B * |T_{zone} - T_{obd}| + C * Wspd + D * Wspd^2) \quad (3.1)$$

Onde I_{design} é o valor de renovações por hora, $F_{Schedule}$ o horário de ventilação definido, as variáveis A , B , C e D são coeficientes de constante, temperatura e velocidade, T_{zone} e T_{obd} são temperaturas da zona e exterior, respetivamente e $Wspd$ a velocidade do vento.

Optou-se por utilizar o valor de renovações por hora de $0,4 \text{ h}^{-1}$ para o período convencional de aquecimento e de $0,6 \text{ h}^{-1}$ para a situação de arrefecimento, dispostos na portaria 379-A/2015 possuindo um horário de ventilação constante para cada período ao longo de todo o ano.

Rugosidade do Terreno

A rugosidade do terreno influencia a velocidade e direção do vento, para tal efeito o EnergyPlus considera cinco tipo de rugosidades distintos *City*, *Suburbs*, *Country*, *Ocean* e *Urban*. Por forma a cumprir as exigências dispostas no REH considerou-se apenas três dos campos em que:

- Rugosidade I – Edifícios situados no interior de uma zona urbana;
- Rugosidade II- Edifícios situados na periferia de uma zona urbana ou numa zona rural;
- Rugosidade III – Edifícios situados em zonas muito expostas, mediante a inexistência de obstáculos que atenuem o vento [13];

Na Tabela 3.7 é possível observar a que terrenos corresponde cada tipo de rugosidade e ainda o valor do coeficiente de rugosidade α . Foi selecionado a utilização do terreno city para todas as zonas climáticas em estudo.

Tabela 3.7: Valores de rugosidade do terreno, retirados do despacho nº15793-K/2013

| Terreno (EnergyPlus) | Rugosidade | α |
|-------------------------|------------|----------|
| City | I | 0,4 |
| Suburbs | II | 0,3 |
| Country | III | 0,2 |

3.7.2 Ventilação entre Zonas

Ao definir duas zonas térmicas dentro de uma fração é necessário para um funcionamento correto da ventilação, a criação de circulação de ar entre ambas as zonas. Em situações reais, não se mantem constantemente todos os elementos de ligação entre as zonas permanentemente fechados. Por forma a definir a circulação de ar, de uma maneira simples utilizou-se o objeto *ZoneCrossMixing*, onde duas zonas trocam a mesma quantidade de ar entre elas afetando o balanço energético de ambas [16]. As trocas de ar são feitas pelas aberturas das portas interiores possuindo um valor de renovações por hora de $0,4 \text{ h}^{-1}$ na estação de aquecimento e de $0,6 \text{ h}^{-1}$ na estação de arrefecimento. O horário de circulação de ar é constante para cada uma das estações ao longo do período de observação.

3.8 Soluções de Envidraçado

Para a análise de soluções envidraçados selecionaram-se 19 sistemas, para além do caso base. As soluções analisadas foram geradas por forma a criar comparações viáveis e observar as alterações na fração criadas pela alteração de tipo de envidraçado.

Optou-se por apenas alterar o vidro em si, em cada análise efetuada mantendo-se o caixilho e a solução de sombreamento propostas ao longo de todas as simulações.

Nos seguintes subcapítulos serão abordadas as várias soluções definidas para o modelo em análise.

3.8.1 Solução de Sombreamento

A proteção das janelas pode ser efetuada pelo exterior, interior e entre os panos de vidros da solução, conforme pode ver visto na Figura 3.14. Por forma a dar continuidade ao raciocínio de seleção utilizado na definição dos elementos opacos, optou-se pela utilização de um sistema exterior, sendo este tipo de solução um dos mais comuns em Portugal e por providenciar uma maior proteção contra a radiação solar impedindo que esta atinja o envidraçado quando o sistema se encontra ativo.

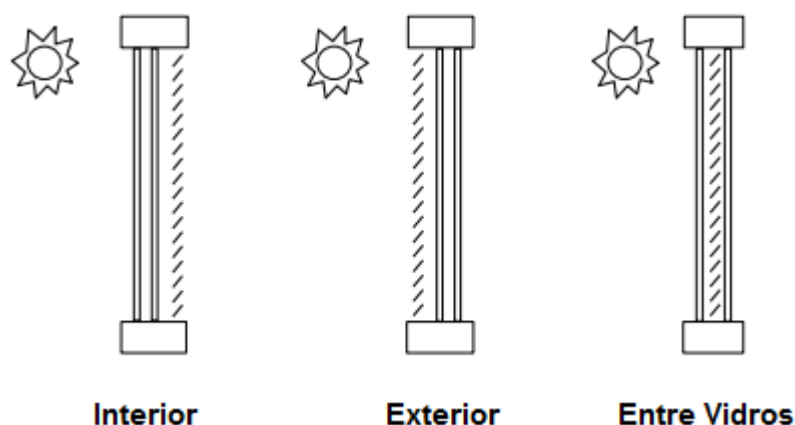


Figura 3.14: Zonas de colocação de sombreamento [16]

Para a solução de sombreamento das janelas optou-se pela utilização de estores de plástico exteriores com baixa refletividade e média transmissão térmica. Tal como acima referido a solução de sombreamento será constante para todas as simulações efetuadas.

Os parâmetros de ativação foram definidos no menu *Thermal Zones and Surfaces*, no objeto *windowproperty:shadingcontrol* onde, *OnNightIfLowOutdoorTempAndOnDayIfCooling* foi o critério selecionado como solução a utilizar. Para a situação noturna o equipamento de oclusão é ativado quando a temperatura exterior for inferior a 17°C já, em situação diurna a ativação dos estores é efetuada na presença de uma temperatura exterior superior a 23°C. Este parâmetro é importante pois os dispositivos permitem através da criação de uma barreira física que, em situação de inverno existam menos perdas térmicas e no verão, em dias de temperaturas elevadas, a diminuição dos ganhos térmicos. Atenuando as necessidades energéticas e aumentando o conforto habitacional sem recorrer a estratégias extras de aquecimento e arrefecimento.

3.8.2 Solução de Caixilho

Foi selecionada uma caixilharia metálica de alumínio com corte térmico como a estrutura envolvente do envidraçado, tal material foi selecionado por ser uma das soluções mais comuns no país. A solução de caixilharia é mantida constante em todas as análises efetuadas para que o estudo recaia apenas na solução de vidro.

Utilizou-se o valor de 2,0 W/m².°C para a condutibilidade térmica da caixilharia considerando um caixilho com corte térmico.

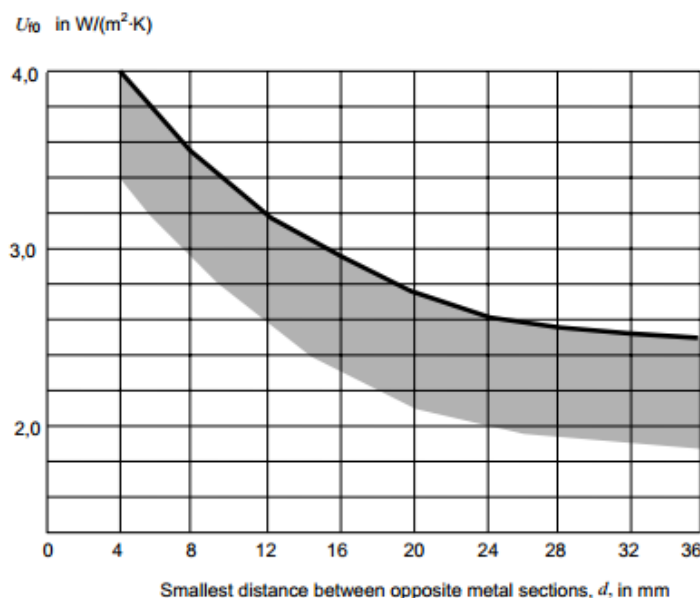


Figura 3.15: Gráfico com Valores de U_{f0} para caixilhos metálicos com corte térmico [23]

O valor foi selecionado considerando a metodologia apresentada na ISO/DIS 10077-1, começando por definir o valor de U_{f0} a partir da seguinte Figura 3.15, onde U_{f0} é a transmissão térmica.

Utilizou-se o valor de 2,0 W/m².°C como valor de U_{f0} considerando uma distância mínima de 24mm entre as seções de metal opostas. Através da equação 3.2 obtém-se o valor da resistência térmica do caixilho, para o valor selecionado obteve-se 0.33 m².°C/W

$$R_f = \frac{1}{U_{f0}} - 0,17 \quad (\text{m}^2\text{C}^\circ/\text{W}) \quad (3.2)$$

Seguidamente, para o cálculo da condutibilidade térmica do caixilho a norma dispõe da equação 3.3:

$$U_f = \frac{1}{R_{si} \cdot \frac{A_{f,i}}{A_{d,i}} + R_f + R_{se} \cdot \frac{A_{f,e}}{A_{d,e}}} \quad (\text{W}/\text{m}^2\text{C}^\circ) \quad (3.3)$$

Onde R_{se} e R_{si} são resistências superficiais exteriores e interiores e A_f (i,e) e A_d (i,e) são as áreas do caixilho, projetadas e desenvolvidas respetivamente. Considerou-se estes fatores (A_f e A_d) com valor igual, pelo que tomam o valor de 1, tornando a condutibilidade térmica apenas dependente da resistência térmica do caixilho e das resistências superficiais. Foi assim obtido o valor de 2,0 W/m². °C, utilizado em todas as simulações efetuadas.

3.8.3 Soluções de Vidro Propostas

Na Tabela 3.8 é possível observar as soluções analisadas, os seus coeficientes de transmissão térmica, os fatores solares (*Solar Heat Gain Coefficient*) e a transmissão visível (*Glass Visible Transmittance*). Todos os valores expostos foram retirados das simulações efetuadas em EnergyPlus, sendo representativos dos vários tipos de vidro analisados.

Como solução base (caso 0) foi selecionado um vidro simples de 3mm. Optou-se por uma solução com um coeficiente de transmissão térmica mais elevado por forma a permitir uma comparação mais acentuada entre o caso base e as soluções mais eficientes.

Do caso 1 ao 3 as soluções de vidro são definidas por vidros simples, sendo que o caso 1 e 3 são soluções de vidro duplo que permitem uma análise comparativa entre o uso de um sistema simples ou duplo do mesmo tipo de vidro.

Os casos 3 e 4 são soluções que influenciam a passagem de luz natural e os ganhos solares comparando com as soluções de vidro simples, tal deve-se ao vidro possuir um tom diferente alterando as suas características. Já nos casos 6 e 7 a passagem de luz e os ganhos solares são exponencialmente elevados, devido a um menor teor de ferro presente no vidro, obtendo valores mais elevados de SHGC e VT no uso independente do vidro que no sistema duplo.

As soluções 8 a 11 são soluções de vidros refletantes que diminuem drasticamente os ganhos solares e a luz natural, sendo soluções vantajosas para climas com elevadas temperaturas. As películas metálicas, que alteram as propriedades do vidro em análise são à base de aço inoxidável (A) e de estanho (C).

De 12 a 16 os casos consistem em soluções de baixa emissividade, alternando o uso de um ou dois vidros, a sua espessura e a ordem de colocação. É de notar que os casos 15 e 16 são soluções que possuem vidros de baixa emissividade de espectro seletivo, permitindo apenas passar uma parcela específica de ganhos solares, o que se reflete no valor de SHGC, sendo este mais baixo que de um vidro de baixa emissividade regular.

Os casos de 17 a 19 consistem em três soluções de vidro triplo, que variam entre o uso de três vidros simples e o uso de vidros de baixa emissividade com vidro simples, analisando as alterações da utilização de mais um vidro no sistema, conforme se pode ver na Tabela 3.8.

Tabela 3.8: Casos de Análise

| | Solução de Vidro | U (W/m²Cº) | SHGC | Glass VT |
|---------|--|------------------------------|-------------|-----------------|
| Caso 0 | Vidro simples 3mm | 5,89 | 0,86 | 0,90 |
| Caso 1 | Vidro duplo 3mm- esp. ar 14 mm | 2,71 | 0,76 | 0,81 |
| Caso 2 | Vidro simples 6mm | 5,78 | 0,82 | 0,88 |
| Caso 3 | Vidro duplo 6mm- esp. ar 14 mm | 2,66 | 0,70 | 0,78 |
| Caso 4 | Vidro verde 6mm | 5,78 | 0,62 | 0,75 |
| Caso 5 | Vidro duplo verde 6mm-simples 6mm -esp.ar 14mm | 2,66 | 0,50 | 0,66 |
| Caso 6 | Vidro "Low Iron" 4mm | 5,86 | 0,90 | 0,91 |
| Caso 7 | Vidro duplo "Low Iron" 4mm-esp.ar 14mm | 2,69 | 0,82 | 0,84 |
| Caso 8 | Vidro "REF A, Mid" 6mm | 4,66 | 0,26 | 0,14 |
| Caso 9 | Vidro duplo "Ref A, Mid" 6mm- simples 6mm - esp.ar 14mm | 2,30 | 0,18 | 0,13 |
| Caso 10 | Vidro "REF C, Mid" 6mm | 4,79 | 0,33 | 0,19 |
| Caso 11 | Vidro duplo "REF C, Mid" 6mm-simples 6mm-esp.ar 14mm | 2,35 | 0,24 | 0,17 |
| Caso 12 | Vidro "LoE" 6mm | 3,44 | 0,64 | 0,84 |
| Caso 13 | Vidro duplo "LoE" 6 mm- simples 6mm-esp.ar 14mm | 1,77 | 0,57 | 0,75 |
| Caso 14 | Vidro duplo simples 3mm- "LoE" 3 mm-esp.ar 14mm | 1,80 | 0,65 | 0,77 |
| Caso 15 | Vidro "LoE SPEC SEL" 6mm | 3,19 | 0,47 | 0,77 |
| Caso 16 | Vidro duplo "LoE Spec Sel" 6mm- simples 6mm esp.ar 14mm | 1,64 | 0,42 | 0,68 |
| Caso 17 | Vidro Triplo simples 3mm-esp.ar 14mm | 1,74 | 0,68 | 0,74 |
| Caso 18 | Vidro Triplo simples 3mm - simples 3mm - "LoE" 3mm - esp.ar 14mm | 1,24 | 0,58 | 0,70 |
| Caso 19 | Vidro Triplo "LoE" 3mm-simples 3mm-"LoE" 3mm - esp.ar 14mm | 0,96 | 0,47 | 0,66 |

É de referir que o espaço entre vidros é preenchido por ar atmosférico e possui uma espessura de 14mm para todas as soluções apresentadas na Tabela. Optou-se por manter o mesmo tipo de gás entre os vidros e a sua espessura constante por apenas se querer analisar os vidros e os seus efeitos.

Através do documento *Window Glass Materials*, disponibilizado pelo EnergyPlus, foram selecionados e retirados os valores dos fatores de cada solução de vidro utilizada. Os valores retirados foram introduzidos no objeto *WindowMaterial:Glazing* onde seguidamente no objeto *Construction* são dispostos conforme o caso em análise, sendo definidos do exterior para o interior. Nos casos onde é existente espaço de ar é necessária a sua definição nos objetos *WindowMaterial:Gas* e *Material:AirGap* onde são definidos o tipo de gás e a sua resistência térmica, respetivamente. Optou-se por utilizar os valores disponíveis pelo EnergyPlus para os vários vidros, pois apesar de os fabricantes fornecerem toda a informação sobre os vidros comercializados, não apresentam todos fatores necessários para a modelação correta dos vidros no programa, o que levou à utilização do documento acima referido.

Na Tabela 3.9, é possível analisar os coeficientes de transmissão térmica dos vãos envidraçados para cada uma das zonas climáticas de Inverno. É de notar que nem todas as soluções em análise respeitam estes valores, possuindo valores superiores aos recomendados.

Numa primeira fase de avaliação, onde se analisará os balanços energéticos e as necessidades de aquecimento e arrefecimento, não serão tidos em conta os valores de referência pois apenas se pretende analisar a influência dos sistemas na fração. Já na fase de análise de custo de ciclo de vida das soluções apenas serão avaliadas as hipóteses que sejam iguais ou inferiores aos valores propostos pela portaria nº379-A/2015 para cada uma das regiões por forma a se obter uma solução de custo ótimo que se encontre dentro dos parâmetros exigidos pelo REH.

Tabela 3.9: Coeficientes de Transmissão Térmica superficiais de referência de vãos envidraçados para Portugal continental retirados da portaria nº349-B/2015 [13]

| U_{ref} (W/m ² °C) | Zona Climática | | |
|--|----------------|---------|----------|
| | Lisboa | Coimbra | Bragança |
| | I1 | I2 | I3 |
| Vãos Envidraçados (Portas e Janelas) U_w | 2,9 | 2,6 | 2,4 |

3.9 Sistema de HVAC

Para a elaboração do sistema de HVAC utilizou-se os menus *Zone HVAC Controls and Thermostats*, *Zone HVAC Forced Air Units* e *Zone HVAC Equipment Connections*.

Foi imposto como referido anteriormente, valores de mínimo e máximo de temperatura interior de 20°C e 25°C. Devido à existência de duas zonas térmicas distintas optou-se pela criação de dois sistemas

de climatização. O horário definido para a climatização foi um horário permanente, mantendo a temperatura da fração dentro dos valores estabelecidos mesmo se esta se encontrar desocupada. A decisão de colocar horário de climatização permanente leva a uma análise mais conservativa, pois existe um gasto maior de energia para manter a fração nas condições desejadas assumindo assim uma análise com o pior caso de utilização.

No objeto *ZoneHVAC:IdealLoadsAirSystem*, presente no segundo menu mencionado, são definidos os dois sistemas de ar condicionados. A vantagem deste objeto é de calcular as quantidades de ar sem ter de modelar as unidades de um sistema de HVAC, tornando a criação deste mais simples. Este sistema criado funciona como um sistema ideal, onde mistura o ar exterior com o da zona, em quantidades específicas e adiciona ou remove o mesmo conforme a necessidade.

3.10 Período de Simulação

Considerou-se para efeitos de estudo a duração de um ano como o período de simulação correspondendo a uma simulação no EnergyPlus de 8760 horas para cada um dos casos estudados. Todos os valores obtidos nas análises efetuadas são então valores anuais, seja uma média anual como o caso do valor das temperaturas, ou uma soma anual como os valores obtidos para necessidades de aquecimento e arrefecimento. Do seguinte modo torna-se possível uma análise comparativa entre as diversas soluções de envidraçado.

3.11 Análise de Custo de Ciclo de Vida

Para a análise do custo de ciclo de vida foi utilizado o método descrito no capítulo 2, imposto pela Diretiva 2010/31/EU e complementada pelo regulamento No. 244/2012.

A metodologia proposta é apresentada através das seguintes equações 3.4 e 3.5 [19]:

$$C_g(\tau) = C_I + \sum_j [\sum_{i=1}^{\tau} (C_{a,i}(j) \times R_d(i)) - V_{f,\tau}(j)] \quad (3.4)$$

$$R_{d,i} = \left(\frac{1}{1 + \frac{R}{100}} \right)^{\tau} \quad (3.5)$$

Onde C_g é o custo global dependente de, C_i o custo inicial, $C_{a,i}$ o custo anual de energia do ano i , R_d o fator de desconto e V_f o valor residual dos sistemas. O fator de desconto (R_d) é dependente da taxa de desconto percentual (R) e do tempo de vida útil do edifício (τ).

Para a análise das soluções foi considerado um tempo de vida útil de 30 anos sendo que no regulamento completar da EPDB [19] é sugerido que o período de cálculo varie entre os 20 e os 30 anos. Foi ainda considerada uma taxa residual de 4% imposta pelo estado português [29].

À metodologia sugerida pelo regulamento foi feita uma adaptação, considerando os valores por m^2 através da divisão pela área de pavimento útil da fração (A_p) e foi ainda alterado o valor residual das

medidas efetuadas ao fim do tempo (Vf), considerado então o custo global da solução de referência ($C_{g,ref}$), obtendo a equação 3.6. A adaptação é sugerida por não se considerar o valor inicial da construção, tornando o valor residual dos sistemas um valor com pouco significado [24].

$$C_g = \frac{C_i + \sum_{i=1}^{30} (C_{a,i} \times R_{d,i})}{A_p} - \frac{C_{g,ref}}{A_p} \quad (3.6)$$

Foi ainda considerado que os custos anuais de energia ($C_{a,i}$) são calculados segundo a equação 3.7 onde o valor de Energia para águas quentes sanitárias (Q_{AQS}) não foi considerado por não ter sido modelado em EnergyPlus e por não ser relevante para os sistemas em avaliação.

$$C_{a,i} = (Q_{aquecimento} + Q_{arrefecimento} + Q_{AQS}) \times \epsilon_{eletricidade} \quad (3.7)$$

Onde $Q_{aquecimento}$ e $Q_{arrefecimento}$ são Energia para aquecimento e arrefecimento, respetivamente, e $\epsilon_{eletricidade}$ é o custo da eletricidade no ano i .

Na determinação das energias de aquecimento, arrefecimento e necessidades nominais anuais globais de energia primária (Ntc). Foram utilizados valores de eficiência nominal de 3,2 e 3,6 para arrefecimento e aquecimento respetivamente, correspondente a um equipamento de produção térmica de classe A, presente na portaria nº379-A/2015. Foi ainda utilizado um valor de fator de conversão (F_{pu}) de 2,5 como fator de conversão para equipamentos a eletricidade, valor presente no REH [13].

Para o custo de energia anual durante o ano i foi considerado um valor de 0,144 para o preço da eletricidade valor disposto no despacho nº15793-D/2013 do REH. a taxa de inflação manteve-se constante apesar de não ser correspondente à realidade de forma a manter o valor ao recomendado pelo REH.

Apenas foram analisadas as soluções que tenham os seus coeficientes de transmissão térmica inferiores ou iguais aos valores de referência dispostos no REH, o que origina um número de 12 soluções para a região de Lisboa e de 8 para as regiões de Coimbra e Bragança. A diminuição do número de soluções entre as diferentes zonas climáticas é expectável, pois conforme a diminuição da temperatura as exigências dos vãos envidraçados aumentam, diminuindo o valor de referência do coeficiente de transmissão térmica superficial dos vãos envidraçados.

Os valores dos investimentos iniciais nas soluções de envidraçado foram calculados com base no gerador de preços [30] e vendedores de sistemas de janelas.

4 Resultados

O presente capítulo expõe e trata os valores obtidos em todas as simulações efetuadas. Pretende-se obter uma análise que defina e caracterize as melhores soluções de envidraçado para as regiões de Lisboa, Coimbra e Bragança e, que melhorias são observadas na fração em estudo. É também apresentado o custo de ciclo de vida das soluções de forma a encontrar a solução de custo ótimo.

Apresentam-se de seguida os valores obtidos para as diversas análises efetuadas para as três regiões selecionadas. É ainda de referir que as análises são efetuadas para três áreas de envidraçado diferentes uma onde 15% da área de parede é ocupada com vidro, uma com 25% e outra com 30%.

4.1 Região de Lisboa

4.1.1 Balanço energético

Área de Vão Envidraçado -15%

Na Figura 4.1 observa-se os valores obtidos relativos ao balanço energético na estação de aquecimento das 19 soluções analisadas de vãos envidraçados. O balanço energético é obtido através da subtração entre os ganhos e as perdas de calor (fluxos de calor) pelos vãos envidraçados.

As barras a verde são representantes das soluções envidraçadas orientadas a Norte, presentes na zona térmica 1. Já as barras laranjas representam os envidraçados da zona térmica 2, que se encontram com a orientação a Sul e Oeste. Na estação de aquecimento é necessário que as soluções possuam valores positivos no balanço energético, o que se traduz em mais ganhos do que perdas térmicas e por associação uma melhoria nas necessidades de aquecimento, diminuindo o seu valor.

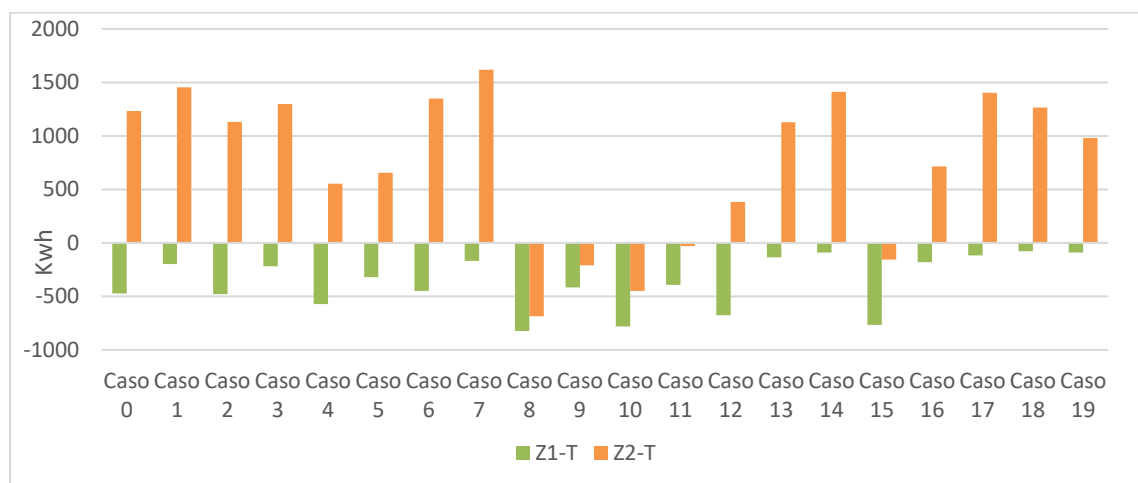


Figura 4.1:Gráfico de Balanço Energético - Período de Aquecimento -Lisboa-15%

É possível logo em primeira análise observar o impacto provocado pelas diferentes orientações nos envidraçados, onde a fachada a norte é a mais desfavorável devido a exposição solar mais reduzida. Na fachada a Sul ocorre o inverso, sendo esta mais exposta à radiação solar, na estação de

aquecimento. Devido a estes fatores, a Zona térmica 1 apresenta diferenças de balanços energéticos entre ganhos e perdas térmicas muito reduzidas em comparação com os valores obtidos na zona térmica 2.

Analisando em maior detalhe é possível verificar que nenhum dos balanços energéticos da zona 1 atinge valores positivos existindo sempre mais perdas do que ganhos, independentemente da solução simulada, o que evidencia a influência que a exposição solar possui no balanço energético dos vãos envidraçados. O caso 18 (composto por um sistema de vidro triplo com dois vidros simples e um de baixa emissividade) apresenta um valor de -76,71 kWh, sendo a melhor solução para a zona térmica 1. Já o caso menos eficiente, caso 8 (solução de vidro com uma película de reflexão aço inoxidável e possuindo um baixo valor de SHGC) apresenta um valor de -824 kWh. Como a percentagem de ganhos térmicos é menor, a introdução de um sistema de reflexão diminui o aproveitamento da radiação solar, para além de que a solução diminui não só os ganhos solares, mas também a entrada de luz.

Para a zona térmica 2 o caso que garante um balanço mais positivo é o caso 7, possuindo um valor de 1618,4 kWh, composto por um sistema duplo de vidro *low Iron* e estando orientado a Sul o sistema é propício a ganhos solares elevados. É de referir que os casos 1,14 e 17 apresentam valores de balanços energéticos elevados para a zona 2, sendo boas soluções para o período de aquecimento, tal como o caso base que apresenta um valor de 1231,3 kWh.

Novamente o caso 8 volta a ser o menos eficiente obtendo -685,6 kWh, valor que não dista consideravelmente do valor obtido para a zona 1, tal deve-se à elevada reflexão da solução.

É ainda de notar que os casos onde se obtém valores de menor eficiência para a estação de aquecimento, que apresentam um maior número de perdas térmicas, são casos com valores de SHGC reduzidos. Apresentam características de reflexão, de baixa emissividade ou ainda de baixa emissividade que captam apenas parte do espectro solar.

A Figura 4.2 representa os valores obtidos para a estação convencional de arrefecimento na região de Lisboa. Ao contrário do período de aquecimento, pretende-se que as perdas sejam superiores aos ganhos para que a fração não sobreaqueça, diminuindo as necessidades de arrefecimento.

Como as temperaturas exteriores são superiores à temperatura interior, na estação de arrefecimento, as perdas térmicas são menores, o que origina no aumento dos valores de balanço energético da zona 1 comparando com os valores obtidos no período de aquecimento, atingindo valores positivos de balanços energéticos na maioria das soluções excetuando os casos que tenham um menor valor de SHGC.

Os casos 8 a 12 e 15 apresentam os valores de balanço energético, para a zona 1 mais favoráveis na estação de arrefecimento, enquanto a zona 2 devido à sua maior área de envidraçado possui uma menor quantidade de casos de balanço negativo sendo estes 8,10 e 15.

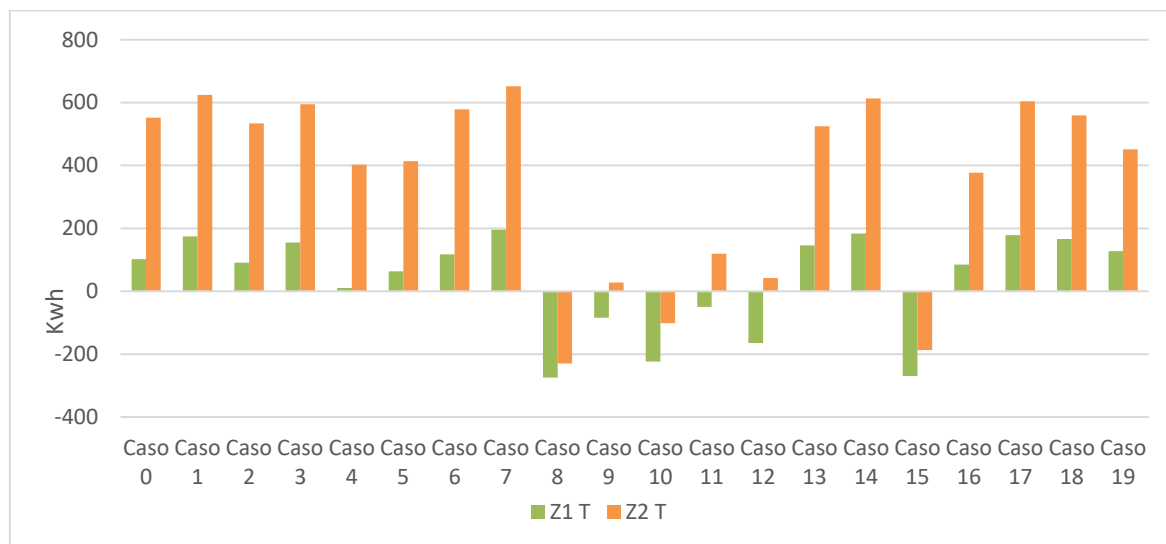


Figura 4.2: Gráfico de Balanço Energético - Período de Arrefecimento -Lisboa-15%

A solução menos eficiente para ambas as zonas térmicas é o caso 7, possuindo os valores mais elevados de balanço energético, de 195,69 kWh e 652,33 kWh para as zonas 1 e 2, respetivamente. A solução mais eficiente para as zonas 1 e 2, é o caso 8 com valores de -274,426 kWh e de -229,528 kWh. É composta por um vidro com película de reflexão de aço inoxidável, que apresenta mais perdas que ganhos de calor. O caso 15 (composto por um sistema de vidro de baixa emissividade de espectro seletivo) apresenta valores próximos da solução mais eficiente, tornando-se num dos casos a considerar no período de arrefecimento.

As soluções que com valores reduzidos do fator solar (SHGC) são mais propícias a obterem melhores resultados na estação de arrefecimento por reduzirem a percentagem de calor transmitido para o interior da fração e induzirem a reflexão.

Área de Vão Envidraçado - 25%

O caso 0 da região de Lisboa para 25% da área dos envidraçados corresponde à fração original em estudo. É de notar que para uma maior área de envidraçados os ganhos e as perdas atingem valores superiores aos balanços energéticos no período de aquecimento e de arrefecimento, obtidos nas soluções com 15% de área de envidraçado. Deve-se ao facto de maior área, maior incidência solar logo maior transmissão de calor.

Essa diferença é notada maioritariamente na zona térmica 2 onde as diferenças são maiores devido a sua exposição solar favorável. Tal pode ser observado pela análise da Figura 4.3 onde a solução mais eficiente para a estação de aquecimento, o caso 7, apresenta um valor de 3313,59 kWh, atingindo quase o dobro do obtido para a mesma solução com 15% da área de vidros. O aumento dos valores de balanço energético pode ser verificado analisando os casos 1, 3, 6, 14, 17 e 18 que apresentam resultados favoráveis para situação de aquecimento.

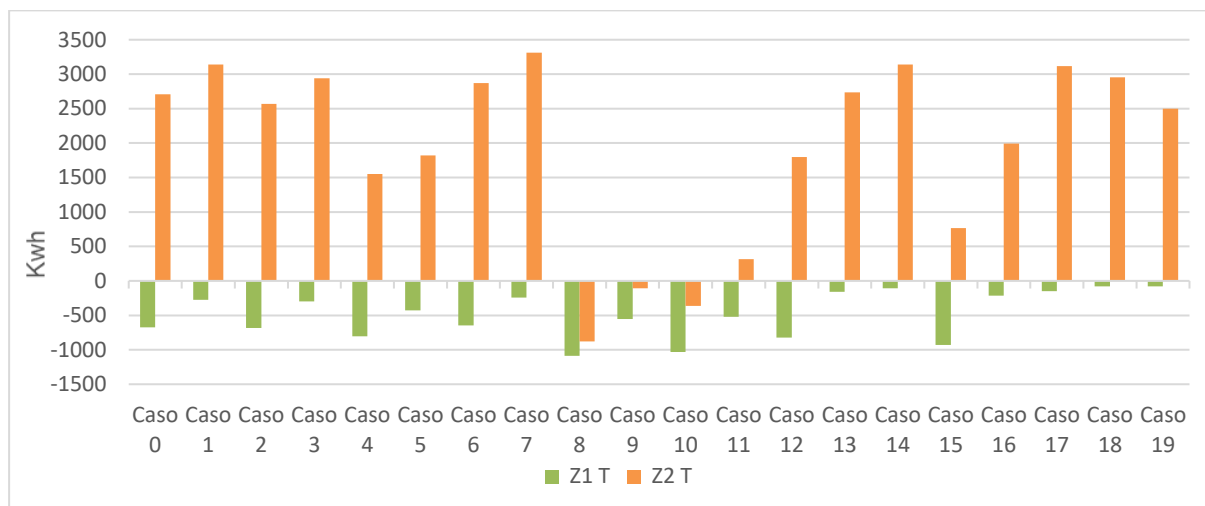


Figura 4.3:Gráfico de Balanço Energético - Período de Aquecimento -Lisboa-25%

Para a zona térmica 1 a diferença entre os valores de ambas as análises de área de envidraçada ocorrem, mas não de maneira tão exponencial. A melhor solução para a zona 1 é o caso 18, com o valor de -78,53 kWh seguida pelo caso 19 com -80,96 kWh, possuindo os valores mais próximos de zero. Ambas as soluções são triplas alterando entre si através da utilização de mais um vidro de baixa emissividade na solução 19. Como a fachada a norte não possui ganhos solares elevados, a utilização de sistemas com *low-e* permite que a dissipação do calor pelas janelas não seja tão elevada como noutras soluções existentes, o que faz com que os balanços energéticos da zona 1 se aproximem mais de zero neste tipo de soluções, tal como também se pode verificar nos casos 13, 14, 18 e 19.

Volta novamente a ser o caso 8 a solução menos eficiente para ambas as zonas o que é expectável tendo em conta que apenas a área das soluções aumentou, apresentando valores de -1086,084 kWh e de -876,56 kWh para as zonas 1 e 2 respetivamente.

É possível ainda observar que nos casos até a solução 16, principalmente visível para os valores da zona 1, ocorrem picos de maior e menor balanço energético. Tal deve-se ao facto de as soluções variarem entre soluções simples e duplas do mesmo sistema de janela, obtendo valores mais elevados para as situações de vidro duplo. A mesma conclusão já não pode ser aplicada para os mesmos casos na zona 2.

Evidencia-se ainda o caso 0 na zona térmica 2 que é a 9ª solução mais eficiente possuindo um valor de balanço energético entre ganhos e perdas de 2710,18 kWh.

Na estação de arrefecimento o aumento de valores de balanço energético ocorre novamente, maioritariamente na zona térmica 2, visível nas situações menos eficientes no período arrefecimento.

Na Figura 4.4 é possível observar os casos 8 a 12 e 15 que apresentam os valores com os balanços energéticos mais reduzidos para ambas as zonas térmicas. Tal como anteriormente analisado, deve-

se ao facto de os sistemas possuírem características como elevada reflexão, baixa emissividade e baixa emissividade com espectro seletivo.

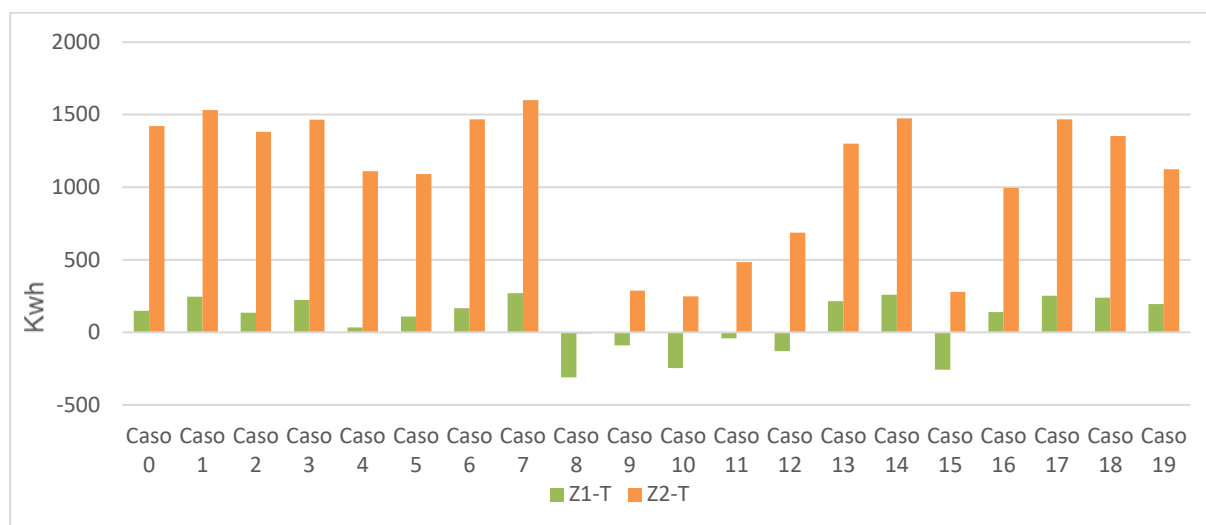


Figura 4.4: Gráfico de Balanço Energético - Período de Arrefecimento -Lisboa-25%

As zonas térmicas 1 e 2 apresentam os valores mais eficientes de -311,01 kWh e -7,09 Kwh para o caso 8. Seguido pelo caso 15 para a zona 1 e pelo caso 10 para a zona 2. O caso 10 é composto por vidro de elevada reflexão com película de estanho, com um valor de SHGC de 0,33, maior que o da solução mais eficiente, mostra que o aço inoxidável apresenta características de maior reflexão funcionando de uma forma mais eficiente para o período de arrefecimento.

Volta a ser o caso 7 o menos eficiente para ambas as zonas. Os valores obtidos foram de 268,77 kWh e de 1600,58 kWh para as zonas 1 e 2 respetivamente.

É de esperar que as soluções mais e menos eficientes não variem consideravelmente independentemente da região e da área de envidraçado.

Área de Vão Envidraçado -30%

Ao considerar-se 30% dos envidraçados, a diferença entre valores de balanço energético das simulações de 25% e de 30% é reduzida, obtendo-se valores próximos devido à diferença entre ambas as áreas de envidraçado não ser elevada.

O comportamento entre os vários casos de estudo é idêntico ao obtido nas análises de 15% e 25% obtendo se gráficos de estrutura semelhantes como se pode ver na Figura 4.5 e Figura 4.6. Principalmente comparando com as soluções de 25%, tanto na situação de aquecimento como de arrefecimento.

Como esperado o grupo das soluções mais e menos eficientes pertencem aos mesmos casos que anteriormente, variando os seus valores minimamente.

Existe uma ligeira alteração, tornando-se a solução 19 a mais eficiente para a zona 1, com um valor de -67,47 kWh, distando desta o caso 18 com o valor de -69,12 kWh. Tal alteração poderá ter sido influenciada pelo aumento da área de envidraçado, tornando o sistema triplo 19 mais eficiente que o 18. Para a zona 2, volta o caso 7 a ser o mais eficiente tomando o valor de 3286,19 kWh.

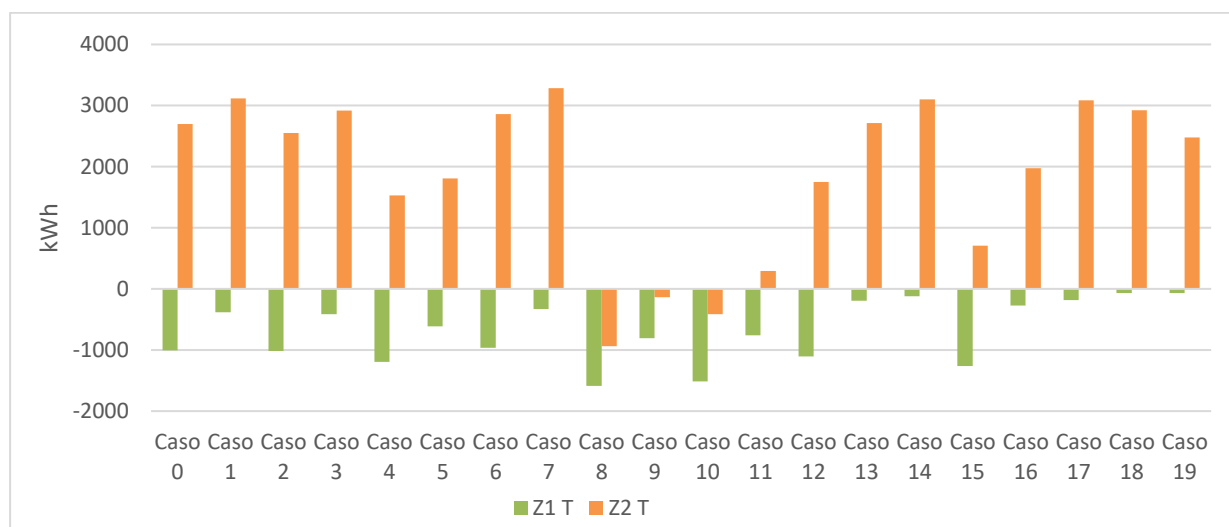


Figura 4.5: Gráfico de Balanço Energético - Período de Aquecimento -Lisboa-30%

Volta o caso 8 a ser o menos eficiente para ambas as zonas na estação de aquecimento, obtendo-se o valor mais baixo de balanço térmico de todos os casos em análise. Obteve-se valores de -1589,93 kWh e -935,51 kWh para a zona 1 e 2, respetivamente.

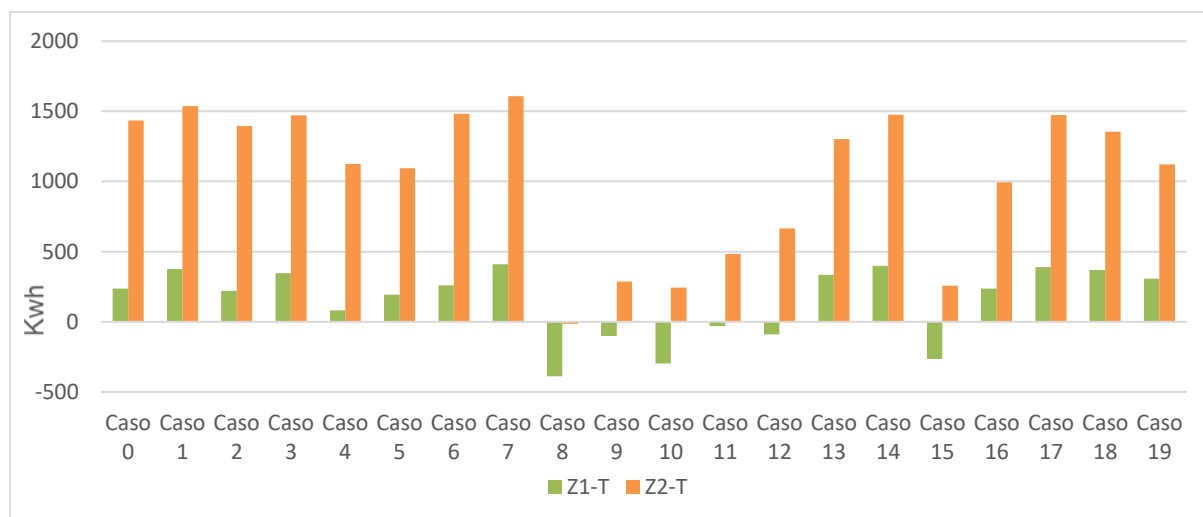


Figura 4.6: Gráfico de Balanço Energético - Período de Arrefecimento -Lisboa-30%

O valor mais eficiente para as zonas 1 e 2 entre todas as simulações efetuadas para Lisboa no período de arrefecimento é pertencente ao caso 8, para área de envidraçado de 30%, tal como aconteceu nas diferentes áreas de envidraçado analisadas anteriormente, tomando o valor de -387,46 kWh para a zona 1 e de -14,91 kWh para a zona 2. A solução menos eficiente é correspondente ao caso 7, sendo

este o caso mais benéfico para o período de aquecimento na zona 2, como tem sido recorrente nas análises anteriormente apresentadas. Obteve-se o valor de 409,89 kWh para a zona 1 e de 1607,39 kWh para a zona 2.

É de realçar que a alteração de valores entre as diferentes áreas de envidraçado, 25% e 30% é mínima principalmente para a zona térmica 2.

4.1.2 Conforto térmico

A análise de conforto habitacional é avaliada a partir do número de horas de desconforto dos utilizadores da fração num período anual, considerando a quantidade de horas em situação de aquecimento e em situação de arrefecimento para cada uma das zonas térmicas obtendo um valor representativo global da fração. Foram também consideradas para o cálculo de conforto habitacional as atividades e a quantidade de roupa, onde se assume o mínimo de vestuário para a estações de aquecimento e arrefecimento.

Na Figura 4.7 são apresentados os comportamentos obtidos para cada um dos casos para as várias áreas de envidraçado em análise.

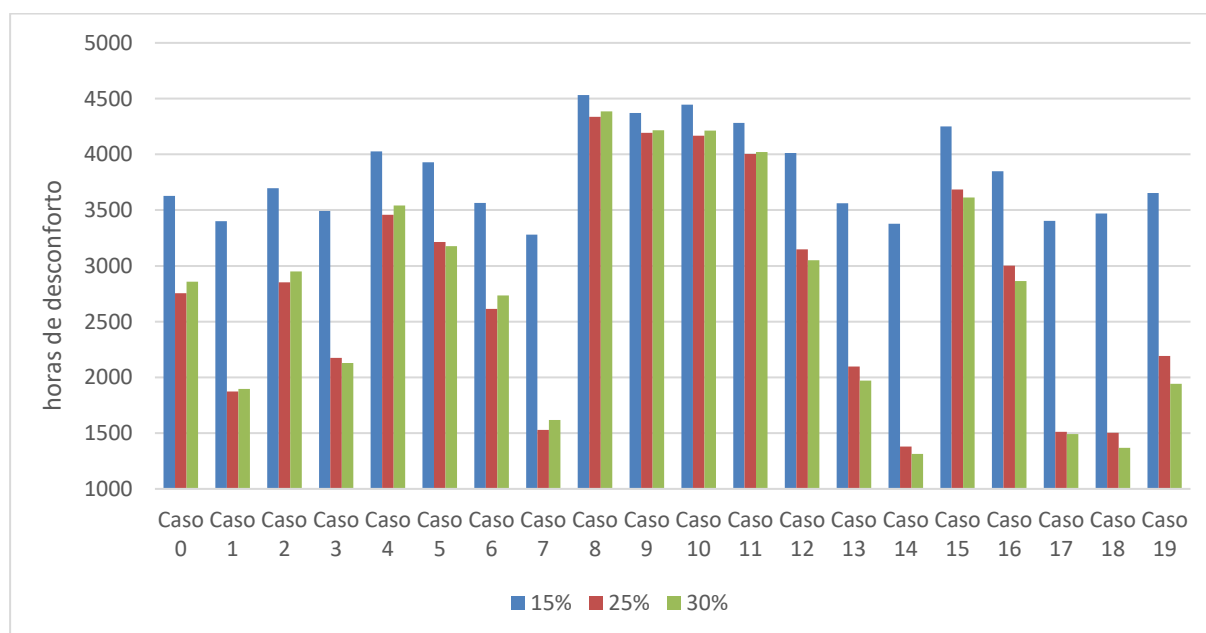


Figura 4.7: Gráfico de Conforto Térmico Interior -Lisboa

A primeira observação que se pode efetuar ao observar a figura é a diferença que se regista entre as áreas de maior e menor envidraçado possuindo os casos referentes a 15% valores de desconforto elevados correspondendo a 5 e 6 meses o que num espaço habitacional não é uma situação viável e desejável.

Já as soluções de 25% e 30% apresentam valores semelhantes entre si, sendo as soluções com melhores balanços energéticos, na estação de aquecimento as que registam um menor número de

horas de desconforto. Assim pode-se chegar à conclusão que a estação de aquecimento está associada ao período que mais impacto cria no conforto térmico interior.

Os casos 1, 7, 13, 14, 17 e 18 são então as soluções que melhores condições de conforto térmico apresentam. O valor de 1369,25 h de desconforto é correspondente ao caso 18 da simulação de 30%, possuindo aproximadamente 57 dias do ano em que as condições de conforto habitacional não são atingidas.

Apesar de a melhor solução de conforto térmico possuir um número de horas de desconforto considerável cumpre as exigências mínimas de 80% de aceitação referidas no ASHRAE 55-2010. Apenas não é verificado o conforto nas simulações de 15%, nenhum dos casos garante o mínimo aceitável. Obteve-se o valor mínimo para o caso 7, com um valor de 3279,25 h que excede o valor máximo aceitável de 1752h sugerido.

4.1.3 Necessidades de Aquecimento e Arrefecimento

As necessidades de aquecimento e arrefecimento presentes na Figura 4.8 e Figura 4.9, são correspondentes à soma das necessidades energéticas das duas zonas térmicas em análise dentro da fração.

Os casos que possuem menores valores de necessidades de aquecimento e arrefecimento são as soluções mais eficientes de balanço energético para cada um dos períodos de análise. Analisando a Figura 4.8, observa-se a existência de soluções que apresentam valores próximos de zero para as necessidades de aquecimento, nas simulações de 25% e 30%. O que origina em necessidades quase nulas, como a situação dos casos 1, 7, 14 e 17 a 19. A solução mais favorável para o período de aquecimento é então o caso 14, para uma área de envidraçado de 25%, obtendo o valor mais baixo de Nic de 1,96 Kwh/m². ano, este apresenta uma melhoria de 86, 7% comparando com a solução base.

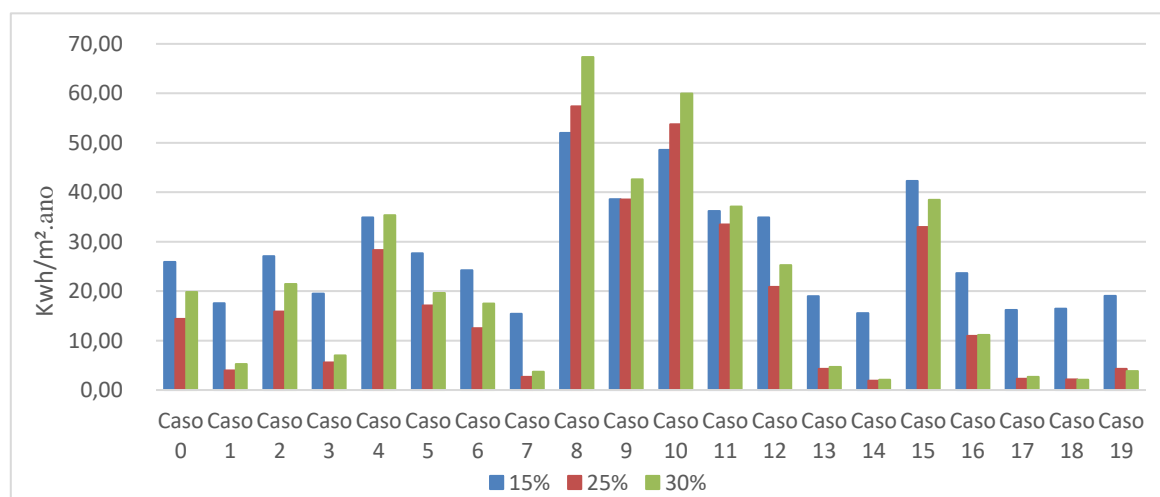


Figura 4.8: Necessidades de Aquecimento Totais-Lisboa

Como esperado, as soluções com um maior coeficiente de transmissão térmica, maioritariamente sistema de apenas um vidro, possuem necessidades de aquecimento mais elevadas do que os respetivos sistemas duplos. Também é visível ao observar a figura, que soluções com um menor fator

SHGC, por diminuírem entrada dos ganhos solares na fração, exigem uma maior necessidade de aquecimento da fração.

É de notar que a zona 1, por não receber ganhos solares suficientes, é aquela que possui maiores valores de necessidades de aquecimento, possuindo uma parcela maior das necessidades que a zona 2. Já o inverso ocorre nas necessidades de arrefecimento devido à zona térmica 2 possuir uma área de envidraçado superior e com a contribuição da orientação solar das suas fachadas, que é propícia aos ganhos solares

Ao invés da estação de aquecimento as simulações com 15% de área de envidraçado possuem um comportamento na estação de arrefecimento superior as simulações de 25% e 30%. Tal facto deve-se à diminuição da superfície dos envidraçados, reduzindo a área de transmissão de calor dos sistemas. A área de envidraçado é um fator crucial na redução das necessidades de arrefecimento visto que a maioria dos ganhos de calor na habitação, são causados pela ação do sol nos vãos.

A solução mais eficiente para a estação de arrefecimento é o caso 8 o que era expectável, devido a ser a solução que diminui maioritariamente os balanços energéticos da fração, obtendo melhorias de 68,47%, 71,57% e 73,59% para as áreas de envidraçado de 15%, 25% e 30%, respetivamente.

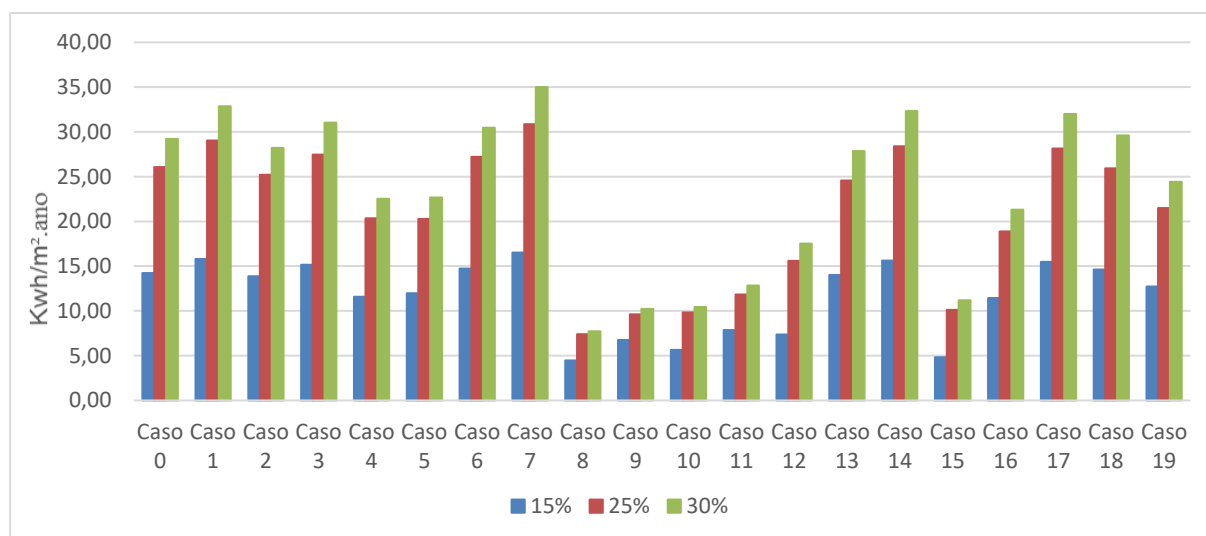


Figura 4.9: Necessidades de Arrefecimento Totais-Lisboa

As soluções com valores de Nvc mais elevados são soluções que possuem um melhor comportamento em período de Inverno, sendo inversamente proporcional o seu comportamento face aos vários períodos de análise.

4.1.4 Custo ótimo de ciclo de vida

Na avaliação do custo ótimo foram apenas avaliadas para Lisboa as soluções que apresentem um valor igual ou menor a 2,9 W/m². °C, valor imposto pelo REH como valor de referência para janelas na zona climática I1. A imposição colocada levou a que 12 soluções fossem analisadas para Lisboa, consistindo em sistemas duplos e triplos de vão envidraçados.

Como é possível observar pela Figura 4.10 a dispersão dos valores das soluções varia proporcionalmente com a área dos envidraçados o que seria de esperar, pois mais área maior o valor a investir, possuindo valores próximos de necessidades de energia primárias para as mesmas soluções, independentemente da área de envidraçado.

Para todas as áreas de envidraçados existentes, foi obtida como a solução ótima o caso 1 composto por uma solução dupla de vidro simples de 3mm com caixa-de-ar de 14mm.

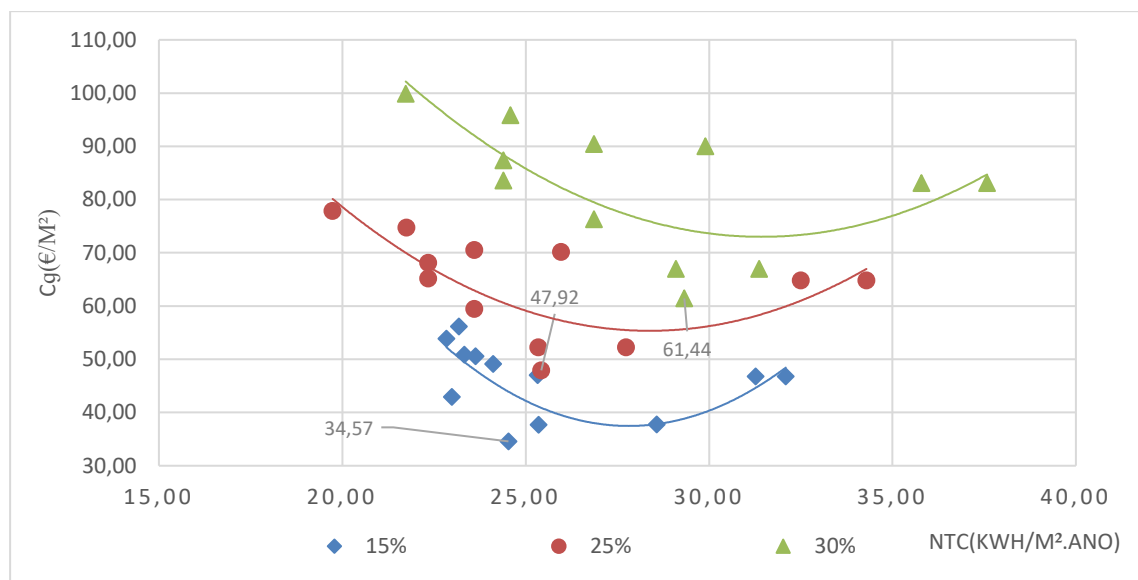


Figura 4.10:Análise do Custo Ótimo -Lisboa

As melhorias obtidas com o caso ótimo são maioritariamente no período de aquecimento. A nível das necessidades de arrefecimento, estas foram aumentadas na ordem dos 11% não sendo uma percentagem de valor elevado, mas que acresce significativamente as necessidades de arrefecimento. Os valores das percentagens das melhorias e das suas necessidades térmicas para as respetivas áreas de envidraçado podem ser encontradas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Valores de Melhoria da solução de custo Ótimo-Lisboa

| | Nic | Nvc | Melhoria (%) | |
|--------------|-------|-------|--------------|---------|
| | | | Nic | Nvc |
| Caso 1 (15%) | 17,55 | 15,80 | 32,25% | -11,05% |
| Caso 1 (25%) | 3,93 | 29,05 | 72,71% | -11,38% |
| Caso 1 (30%) | 5,25 | 32,87 | 73,52% | -12,56% |

Apesar de haver um número elevado de soluções com menor valor de energia primária estas possuem um valor de custo superior, o que leva a que não sejam o caso ótimo. É também importante referir que apesar de o caso 1 ser a solução ótima, de todos os casos obtidos este não garante os mínimos de conforto térmico interior de 1752h em nenhuma das diferentes áreas de envidraçado, o que faz com que a alteração dos envidraçados não seja suficiente para a garantia de um melhor conforto. Apesar de o caso 1 nas soluções de 25% e 30% possuir valores perto do valor máximo de desconforto admitido. Tal conclusão leva a afirmar, que apenas a restrição das soluções que cumpram o valor de U, segundo o REH não garante o conforto térmico. Criando a necessidade de selecionar para análise custo ótimas as soluções que garantem o conforto habitacional.

4.2 Região de Coimbra

4.2.1 Balanço energético

Área de Vão Envidraçado -15%

Tal como na região de Lisboa foram efetuadas as simulações para diferentes áreas de envidraçado.

Os comportamentos das soluções para uma percentagem de 15% de área de vidro são semelhantes aos encontrados na região de Lisboa, não apresentando alterações exponenciais devido a mudança de região.

Os casos mais e menos eficientes para os balanços energéticos de aquecimento e arrefecimento permanecem iguais às soluções da região de Lisboa, confirmando que comportamento do sistema é constante, mas influenciável pela região climática e pelas suas temperaturas. As Figura 4.11 e Figura 4.12 apresentam os gráficos com os balanços energéticos para os períodos de aquecimento e arrefecimento, respetivamente.

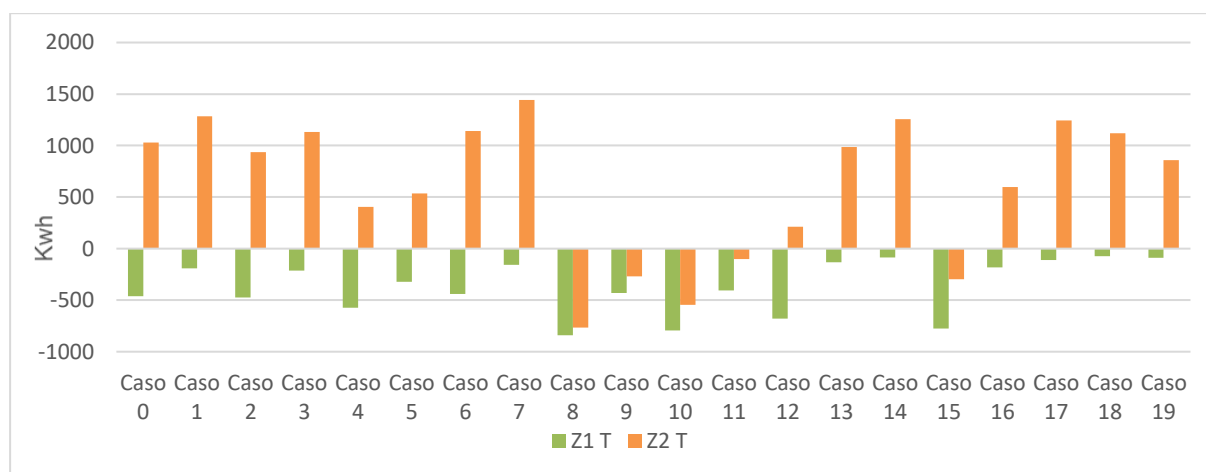


Figura 4.11: Gráfico de Balanço Energético - Período de Aquecimento -Coimbra-15%

Os casos 18 e 7 apresentam os valores de balanço energético mais eficientes na estação de aquecimento para as zonas 1 e 2, respetivamente, com valores de -72,72 kWh e de 1441,4 kWh. O

caso 8 com valores de -840,22 kWh e de -767,36 kWh para as zonas 1 e 2 é a solução menos eficiente. O inverso ocorre para a situação de arrefecimento onde o caso 8 apresenta os valores de maior eficiência para ambas as zonas, obtendo-se os valores de -291,48 kWh e de -217,39 kWh, para as zonas térmicas 1 e 2. Como tem sido recorrente nas simulações anteriormente analisadas volta o caso 7 a ser o mais gravoso no período de arrefecimento, devido às suas características serem propícias à captação de ganhos solares. Para a zona 1 obteve-se o valor de 197,98 kWh e na zona 2 de 750,58 kWh.

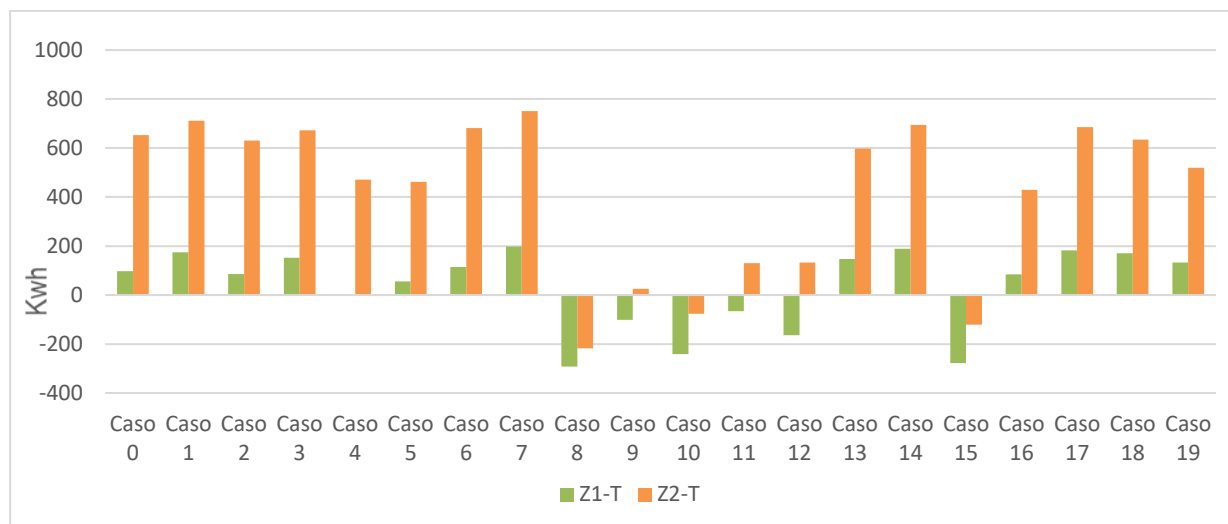


Figura 4.12: Gráfico de Balanço Energético - Período de Arrefecimento -Coimbra-15%

Área de Vão Envidraçado -25%

Tal como as simulações efetuadas em Lisboa é notório o aumento dos valores de balanço energético na zona térmica 2 na situação de aquecimento, comparando os valores com os obtidos nas simulações de 15%. A mudança de região não afeta drasticamente os valores obtidos de ganhos e perdas pelas janelas, variando quantidades pouco significativas ao comparar com as soluções de Lisboa, para a mesma área de vão envidraçado. Assim, é obtido um comportamento semelhante para cada solução como é possível ver na Figura 4.13 e Figura 4.14. O intervalo de casos mais e menos eficientes é mantido maioritariamente constante, possuindo os mesmos casos como os mais eficientes de balanço energético, os casos 18 (zona 1) e 7 (zona 2) para aquecimento e o caso 8 para arrefecimento. Para os casos 18 e 7 são obtidos valores de -66,98 kWh e de 3116,94 kWh, enquanto para o período de arrefecimento é obtido um valor de -343,849 kWh e 0,93 kWh para as zonas 1 e 2, respetivamente.

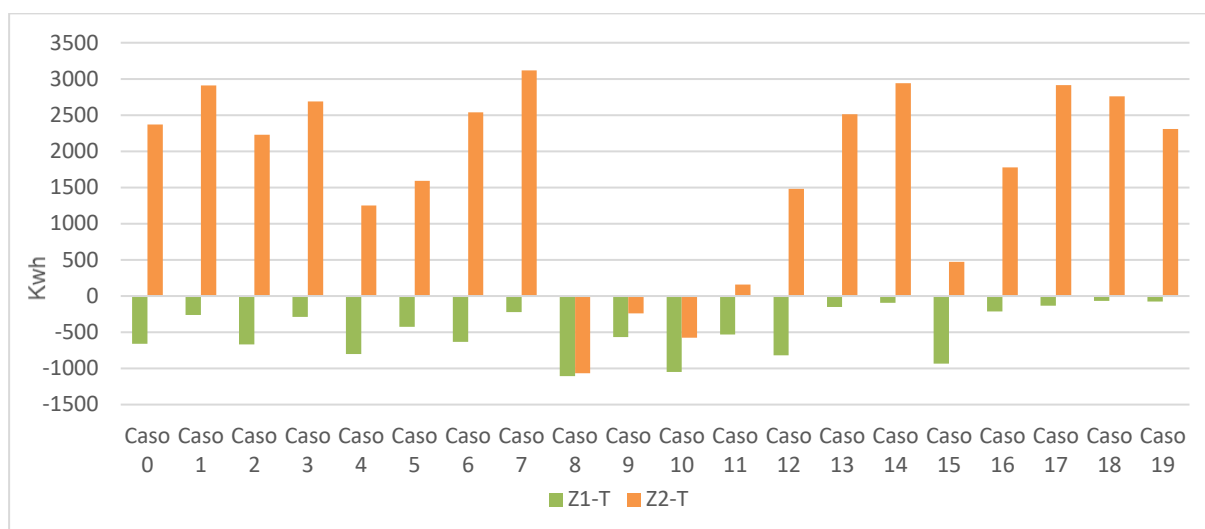


Figura 4.13: Gráfico de Balanço Energético - Período de Aquecimento -Coimbra-25%

Na análise dos casos com os piores balanços energéticos verifica-se novamente que as soluções são inversamente proporcionais, para ambos os períodos de análise. Onde o caso 8 é o caso de menor eficiência para ambas as zonas térmicas no período de aquecimento e apresenta valores de – 1107,63 kWh e de -1067,58 kWh para as zonas 1 e 2.

Os casos 14 e 7 com valores de 246,64 kWh e de 1678,25 kWh correspondem aos valores de menor eficiência energética, para as zonas térmicas 1 e 2, no período de arrefecimento.

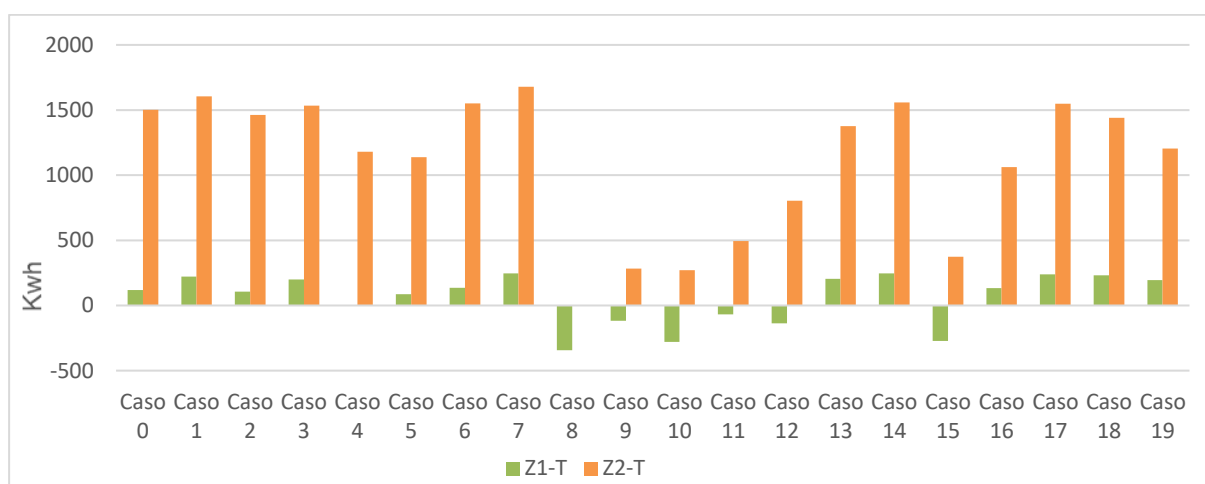


Figura 4.14: Gráfico de Balanço Energético - Período de Arrefecimento -Coimbra-25%

Área de Vão Envidraçado -30%

As Figura 4.15 e Figura 4.16 apresentam os valores de balanço energético para o aquecimento e arrefecimento, respetivamente, para os envidraçados da região de Coimbra com área de 30%. Tal como na região de Lisboa as variações entre os ganhos e perdas das áreas de vidro de 25% e 30% não variam de forma tão visível entre si como na comparação com as simulações de 15%.

Apesar de a região climática ser diferente é apresentado o mesmo tipo de comportamento de ganhos e perdas apresentados na simulação de 30% para a região de Lisboa.

Os valores obtidos de balanço energético de aquecimento para os casos mais favoráveis são de - 46,0982 kWh (caso 18) e de 3082,9 kWh (caso7) para as zonas 1 e 2 respetivamente. Novamente o caso 8 volta a ser o mais prejudicial obtendo valores de -1624 kWh para a zona 1 e de -1128,91 kWh para a zona 2.

Enquanto na estação de arrefecimento o caso 8 se torna o mais eficiente tomando os valores de - 439,95 kWh e de -3,81 kWh para as zonas 1 e 2. Em relação às soluções menos eficientes apresentam se as soluções 14 e 7 para a zona 1 e para a zona 2 sendo os seus valores respetivos 361,001 kWh e 1674,69 kWh.

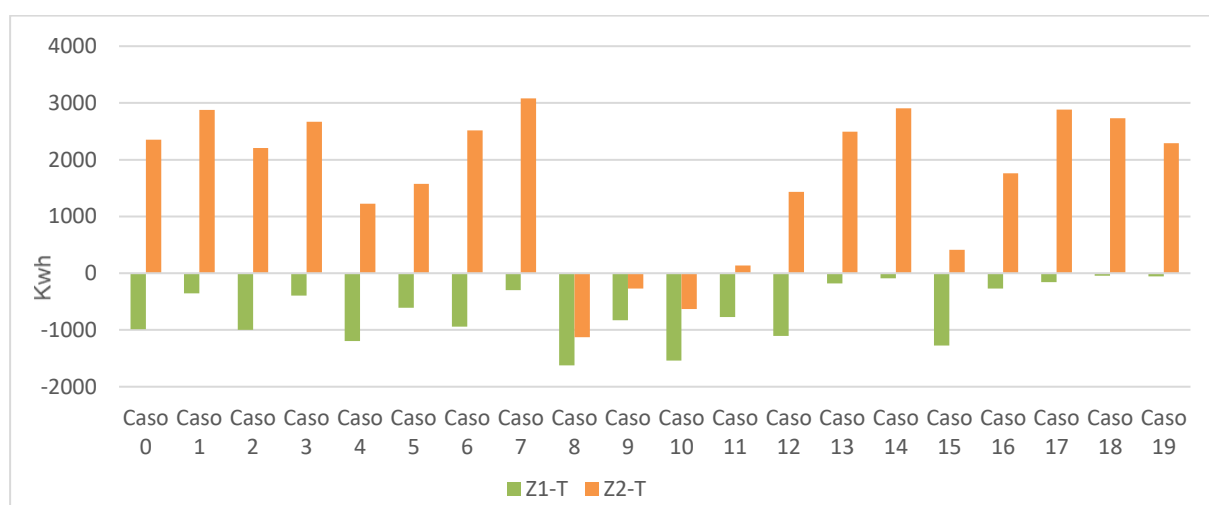


Figura 4.15:Gráfico de Balanço Energético - Período de Aquecimento -Coimbra-30%

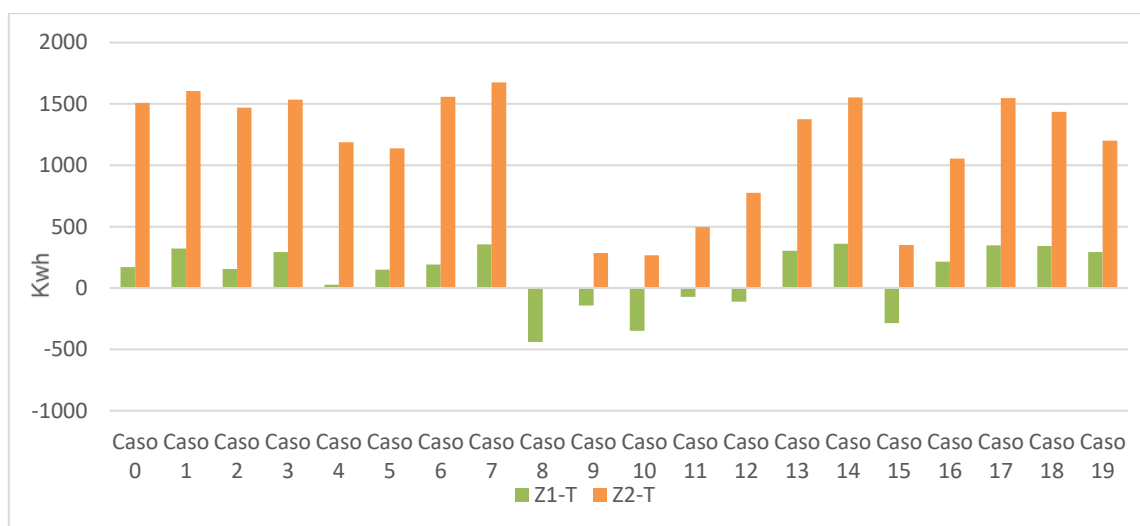


Figura 4.16: Gráfico de Balanço Energético - Período de Arrefecimento -Coimbra-30%

4.2.2 Conforto térmico

A análise do conforto térmico interior para a região de Coimbra foi efetuada para as três simulações de área de envidraçado. Dependente da zona climática e da sua temperatura é possível observar que os valores de desconforto são elevados sendo o mínimo valor de 1906,8h correspondente a um desconforto de aproximadamente 80 dias atribuído ao caso 14, tal valor para o caso mais eficiente de conforto habitacional é elevado.

Na Figura 4.17 é ainda visível que o comportamento entre as soluções de 25% e 30% de área de vidro possuem valores idênticos devendo-se à sua diferença de área ser reduzida. As simulações com 15% de envidraçado voltam a ser as menos confortáveis possuindo valores mais elevados.

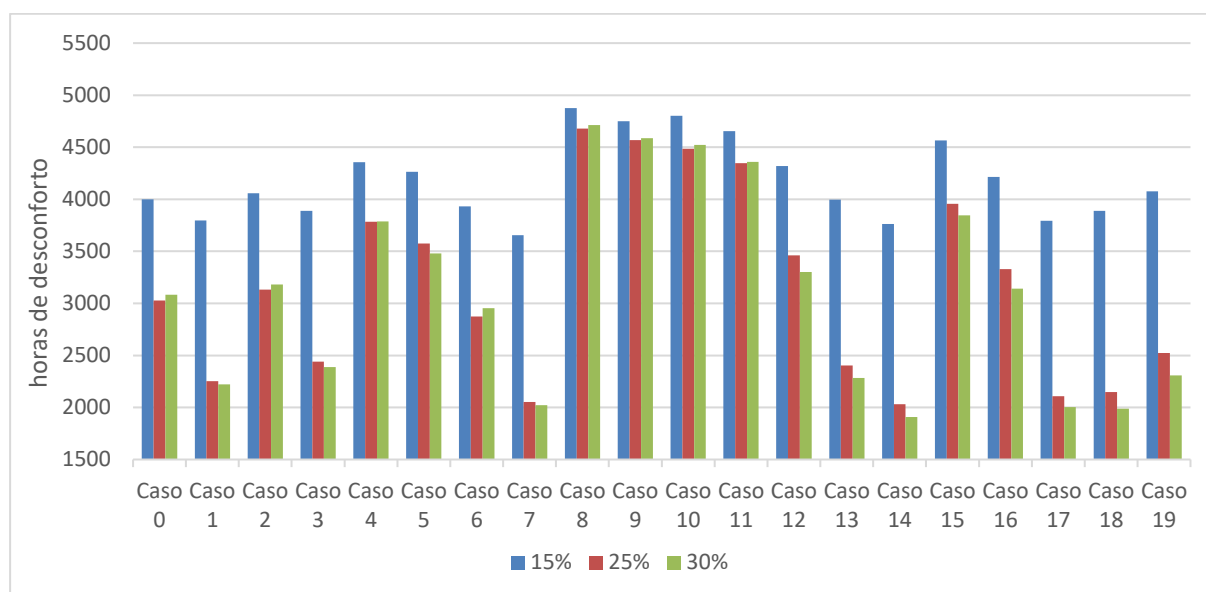


Figura 4.17: Gráfico de Conforto Térmico Interior - Coimbra

Possuindo uma percentagem de 80% mínima de aceitabilidade e ideal de 90% das horas em conforto térmico imposta pelo *ASHRAE 55 2010* é possível através de uma simples conta verificar que para um ano, o número máximo de horas que pode existir de desconforto é de 1752 horas. Assim verifica-se que a solução 14 apesar de possuir um valor menor que as restantes soluções, aparece fora dos parâmetros de aceitabilidade impostos pelo ASHRAE. É de referir que o envidraçado não é único fator que influencia o desconforto, concluindo que a alteração do envidraçado não é suficiente para atingir o conforto térmico para a região de Coimbra.

4.2.3 Necessidades de Aquecimento e Arrefecimento

É nas necessidades de aquecimento e arrefecimento que é notável a alteração da zona climática, possuindo valores de necessidades de aquecimento mais elevados e menores valores para necessidades de arrefecimento do que numa região de zona climática I1. Tal acontecimento deve-se ao facto de as temperaturas exteriores serem inferiores diminuindo conforme a zona climática aumenta.

Na Figura 4.18 e Figura 4.19 apresenta-se respetivamente, as necessidades de aquecimento e arrefecimento para cada tipo de área de vãos, na região de Coimbra. É de notar que para as necessidades de aquecimento as simulações efetuadas com 15% são na maioria dos casos superiores às de 25% e 30%, excetuando o intervalo de casos entre o 8 e o 1 onde o inverso ocorre devido as características de maior reflexão existentes e por simulações de 30% e 25% possuírem maiores área de envidraçado levando a maiores necessidades. O caso 14 é o correspondente ao melhor valor de necessidades de aquecimento. Com um valor de 7,6 kWh/m². ano para uma área de envidraçado de 25% obtêm-se necessidades muito próximas do zero, tal é refletivo no conforto térmico e nos balanços energéticos das várias soluções analisadas, sendo este caso que possui menor valor de horas de desconforto. O caso que apresenta valores de maiores Nic é o caso 8, sendo uma solução espetável por apresentar o melhor comportamento em balanço energético no período de arrefecimento.

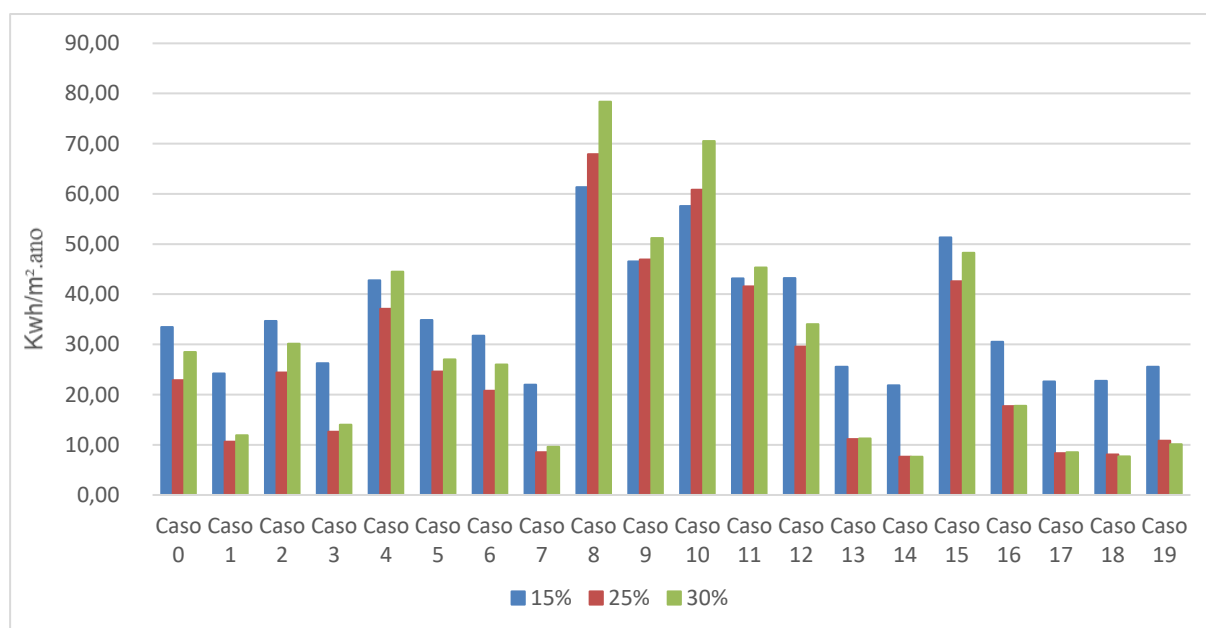


Figura 4.18: Necessidades de Aquecimento Totais-Coimbra

Nas necessidades de arrefecimento a área de 15% possui os menores valores de necessidades devido a sua pequena percentagem de vãos, diminuindo a ação da energia solar na fração o que leva a um melhor comportamento que as soluções apresentadas nas simulações de 25% e 30% que com as suas áreas de vãos de maiores dimensões obtêm necessidades de arrefecimento consideravelmente superiores as obtidas nas soluções de 15%, excetuando nos casos de sistemas de maior reflexão onde os valores entre as diferentes simulações se aproximam mais uns dos outros.

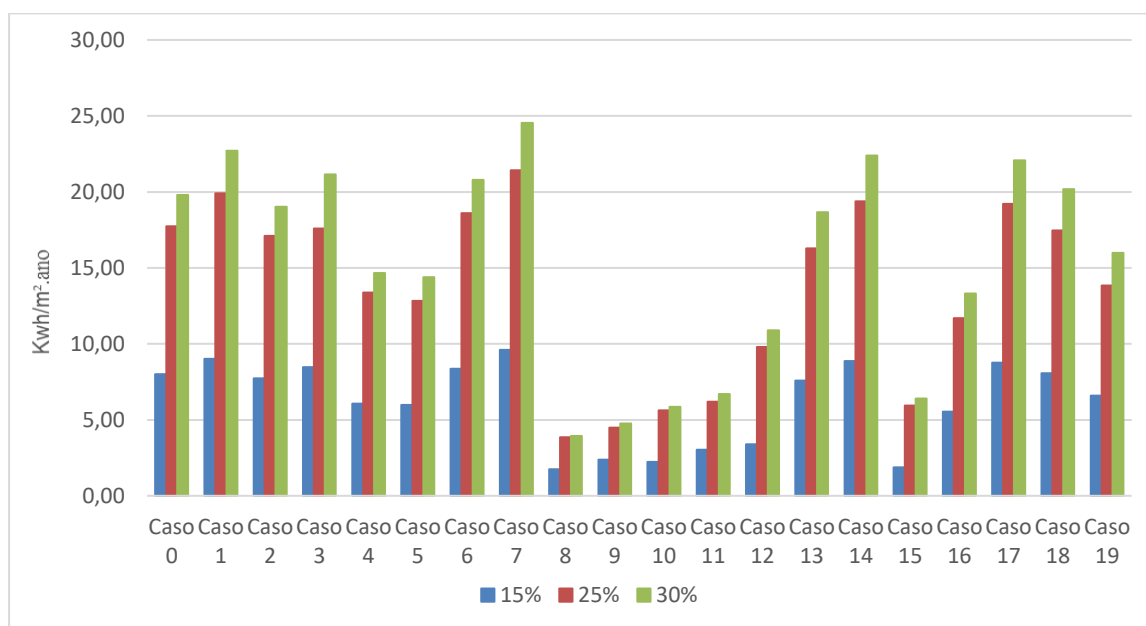


Figura 4.19: Necessidades de Arrefecimento Totais-Coimbra

É o caso 8 a solução com menores valores de necessidades de aquecimento, com um valor 1,75 kWh/m². ano para a solução de envidraçado de 15%. Como anteriormente referido apresenta o melhor balanço energético para ambas as zonas térmicas, tal leva a que a solução mais eficiente seja a solução que melhore a percentagem mais significativa da fração.

4.2.4 Custo ótimo de ciclo de vida

A avaliação da região de Coimbra foi efetuada com um número menor de soluções que Lisboa por possuir requerimentos de coeficiente de transmissão térmica mais elevados, de 2,6 W/m². °C especificamente. Tal parâmetro levou à análise de apenas 8 soluções das 19 propostas.

Na Figura 4.20 é possível observar a dispersão das várias soluções obtendo como solução ótima o Caso 14 composto por um sistema de vidro duplo de vidro simples e vidro *low-e* de 6mm espessura com um espaço de ar de 14mm.

No caso da área envidraçada de 15% pode se notar que o caso ótimo é também o que apresenta menor valor de necessidades de energia primária, sendo a solução perfeita para as simulações de 15% de área de vão.

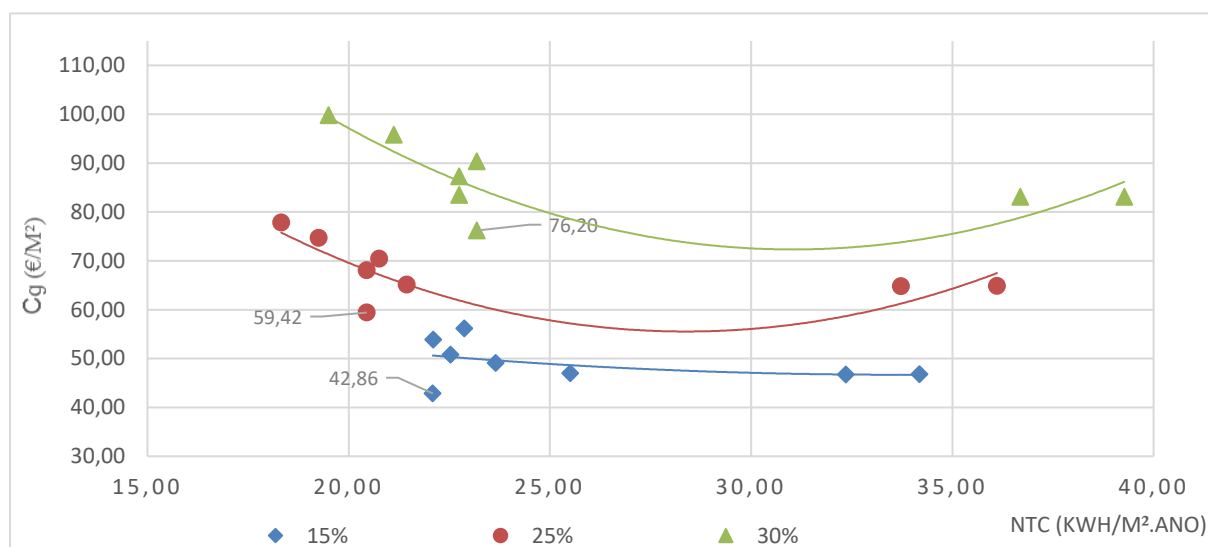


Figura 4.20: Análise do Custo Ótimo - Coimbra

Tal como na solução obtida em Lisboa o caso 14 melhora as condições de aquecimento, como apresentado na Tabela 4.2, aumentando as necessidades de arrefecimento consideravelmente para as simulações analisadas.

Tabela 4.2: Valores de Melhorias da solução de Custo Ótimo - Coimbra

| | Nic | Nvc | Melhoria (%) | |
|------------------|-------|-------|--------------|---------|
| | | | Nic | Nvc |
| Caso 14 (15%) | 21,84 | 8,86 | 34,78% | -10,75% |
| Caso 14 (25%) | 7,63 | 19,39 | 66,64% | -9,27% |
| Caso 14 (30%) | 7,60 | 22,39 | 73,29% | -13,15% |

Novamente a mudança do envidraçado não garante o conforto térmico habitacional sendo ainda mais distante do valor máximo de aceitabilidade que no caso de Lisboa, com o valor mais baixo de 1906,8h. Tal ocorre, pois, as soluções não foram selecionadas com o critério de garantir o conforto térmico o que leva a que esse parâmetro possa não vir a ser verificado. O valor das horas de desconforto aumenta, pois, a fração encontra-se numa zona climática com valores mais rigorosos que os encontrados em Lisboa.

4.3 Região de Bragança

4.3.1 Balanço energético

Área de Vão Envidraçado -15%

Ao analisar a Figura 4.21 é visível uma tendência elevada de perdas para ambas as zonas térmica o que se deve à localização da fração, sendo uma zona climática mais agressiva no período de aquecimento, leva a que haja menos ganhos e, muitas mais perdas devido a diferença de temperaturas entre o exterior e o interior ser elevada, valor que ainda tende a aumentar em casos que diminuem a quantidade de calor transmitido. Sendo que o impacto da zona climática seja mais notório para a zona térmica 2.

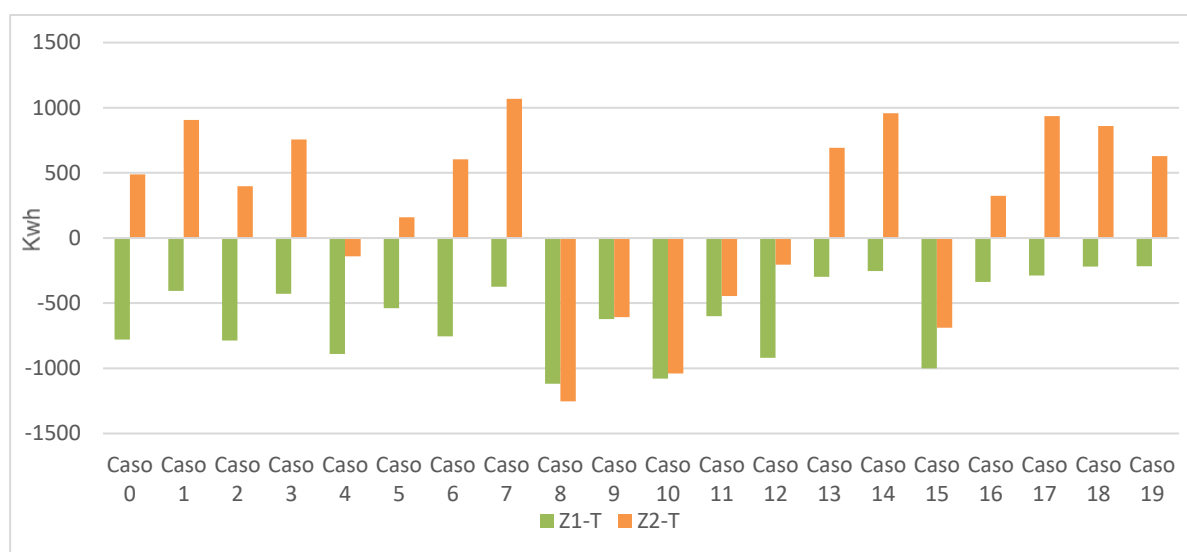


Figura 4.21: Gráfico de Balanço Energético - Período de Aquecimento -Bragança-15%

É ainda necessário considerar que a pequena área de envidraçados ajuda a que os ganhos não sejam tão elevados em alturas de maior exposição solar, tal como o facto de a segunda maior área de envidraçado se encontrar a norte. Apesar de haver um menor valor de ganhos térmicos que nas regiões anteriormente analisadas é novamente o caso 7 o caso considerado o mais eficiente para a zona térmica 2 com 1069,24 kWh e o caso 19 para a zona térmica 1 com um valor de -216,79 kWh seguido pelo caso 18, com uma diferença quase irrisória de unidades.

O caso 8 volta novamente a apresentar-se como a solução mais gravosa para o período de aquecimento fato que provem das suas elevadas características de reflexão mencionadas anteriormente. Regista-se valores de -1119,13 kWh e de - 1252,66 kWh para as zonas térmicas 1 e 2 respetivamente.

Para a estação de arrefecimento (Figura 4.22) o impacto causado pela região mais a norte é ligeiramente notório, comparando com as restantes regiões foram visíveis valores menores para a zona

térmica 1 e valores superiores para a zona térmica 2, excetuando nesta zona soluções que propiciem a reflexão.

Os casos 8 e 7 tornam a ser as soluções mais e menos eficientes na estação de arrefecimento, tal como nas regiões anteriores. No caso 8 são obtidos valores de -359,88 kWh e de -279,221 kWh para as zonas 1 e 2, enquanto no caso 7 por potencializar os ganhos apresenta valores de 176,6 kWh e de 908,21 kWh.

As soluções que potencializam os ganhos térmicos são as soluções que pior performance apresentam no período de arrefecimento, sendo por isso os piores casos. As soluções 1, 2, 14 e 17 são uns dos exemplos que podem ser considerados.

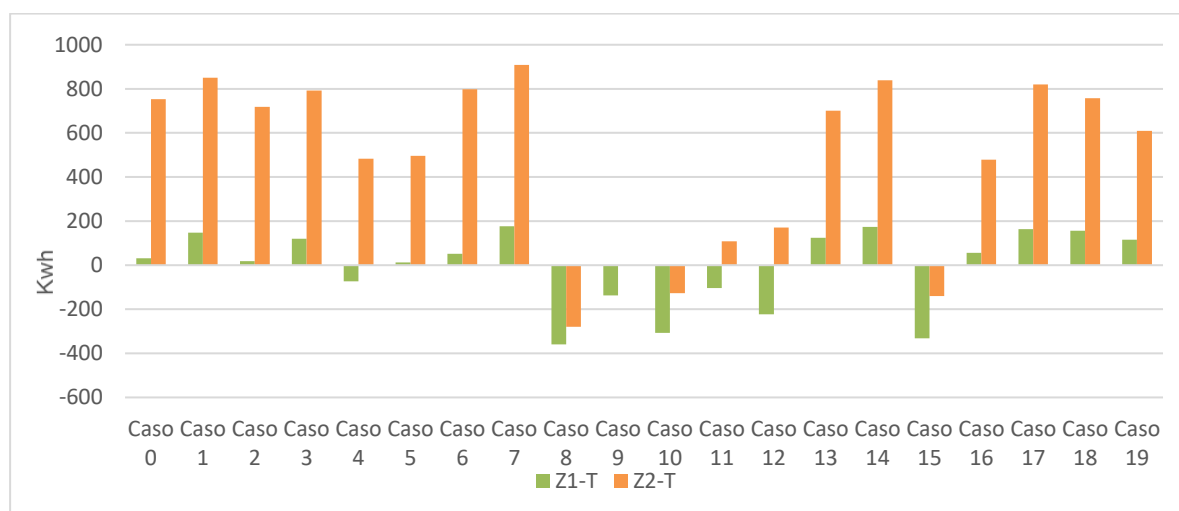


Figura 4.22: Gráfico de Balanço Energético - Período de Arrefecimento -Bragança-15%

Área de Vão Envidraçado -25%

Devido a uma área superior de envidraçado é notório a melhoria de ganhos térmicos na zona térmica e um melhor balanço energético para a região de Bragança comparando com os valores obtidos para as simulações de área menor, obtendo um comportamento semelhante ao das regiões de Lisboa e Coimbra embora de valor ligeiramente inferior.

Tal como nas regiões analisadas anteriormente e como na simulação de 15% são os casos 19 (-235,2 kWh) e 7 (2813,2 kWh) os que apresentam um melhor comportamento para as zonas térmicas 1 e 2, respetivamente.

Ao analisar detalhadamente a Figura 4.23 é de notar que com a mudança de regiões os valores da zona térmica 1 vão cada vez mais se afastando do valor de 0, tornando-se soluções menos favoráveis para a zona climática.

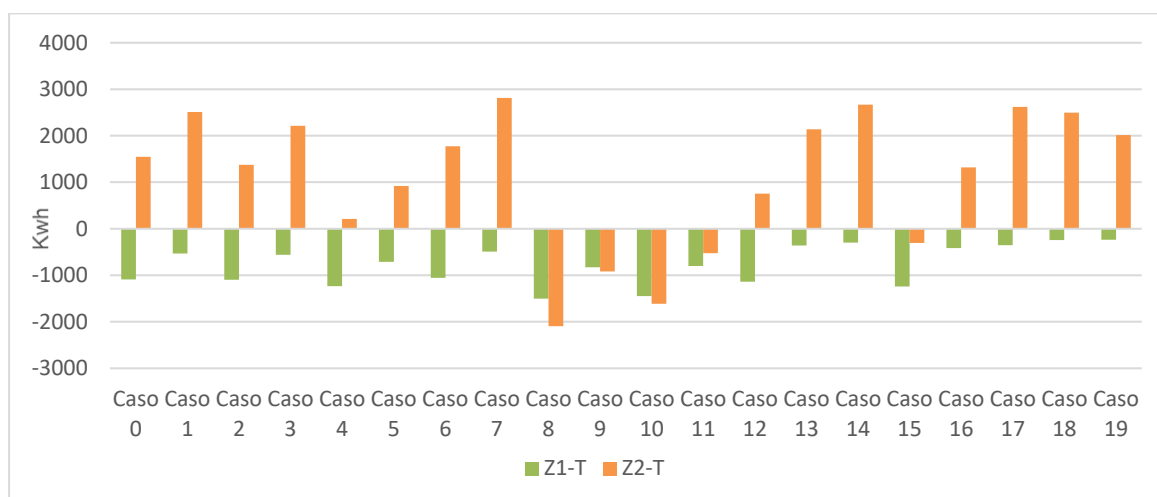


Figura 4.23: Gráfico de Balanço Energético - Período de Aquecimento -Bragança-25%

O caso mais prejudicial para a estação de aquecimento é como se tem vindo a refletir nas análises anteriores o caso 8 com um valor de -1501 kWh para a zona 1 e de -2092 kWh. É ainda de referir que devido à localização geográfica o caso 8 induz a que as soluções envidraçadas da zona térmica 2 apresentem valores mais negativos que os da zona 1, apesar de esta se encontrar com uma exposição solar mais favorecida.

Na estação de arrefecimento devido as temperaturas exteriores serem superiores às interiores e sendo que o fluxo de calor se dá das zonas mais quentes para as mais frias é esperado um maior ganho térmico e uma menor perda de calor, o que é refletido e visível na Figura 4.24 onde a zona 1 com fachada a norte apresenta um maior número de valores de balanço energético positivos.

O caso mais eficiente volta a ser o caso 8 para ambas as zonas térmicas com valores de -440,4 kWh para a primeira e de -118,7 kWh para a segunda. Nos casos 10 e 15 são também visíveis boas soluções para o período de arrefecimento não distando muito dos valores obtidos para a solução 8.

Como a solução 7 apresenta elevados valores de ganhos, devido ao seu menor teor de ferro, esta é a solução menos eficiente do período de calor, tendo sido uma constante no decorrer da análise de resultados. Os seus valores para a zona térmica 1 e 2 são respetivamente 257,73 kWh e 1921,6 kWh. Os casos 1 e 14 são casos que apresentam comportamentos semelhantes ao caso 7 contendo características menos benéficas para o período de arrefecimento.

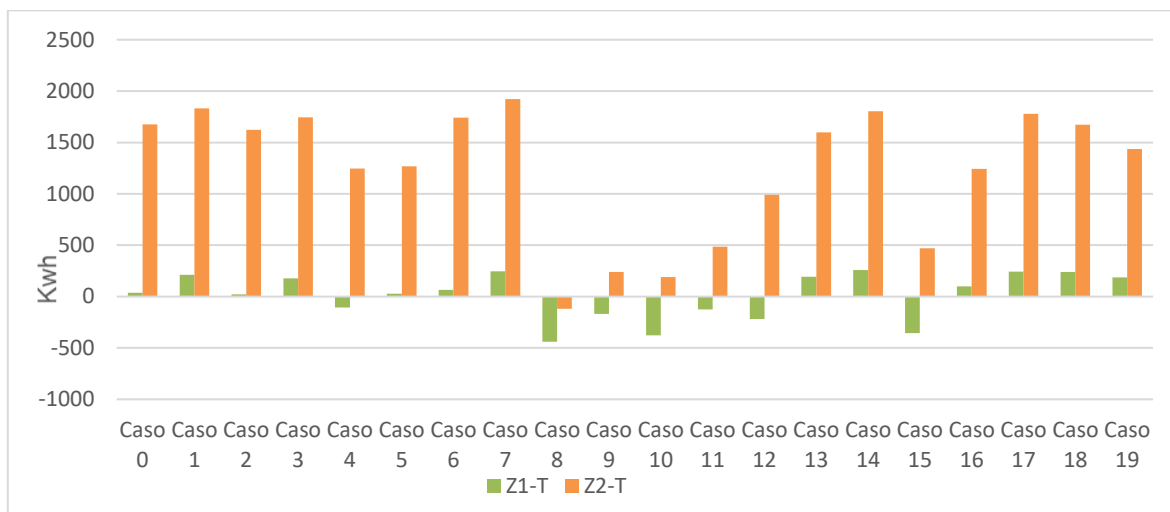


Figura 4.24: Gráfico de Balanço Energético - Período de Arrefecimento -Bragança-25%

Área de Vão Envidraçado -30%

Enquanto nas simulações anteriores de 15% de área, os valores do balanço energético diminuem devido à pequena área de envidraçado, as simulações de 30% decrescem devido à sua elevada área de vidro que aumenta as perdas de calor na fração.

Como se pode ver a partir da Figura 4.25 e observando a zona 2, que permite uma melhor análise visual, os valores do balanço vão decrescendo á medida que se vai aumentando a espessura do vidro possuindo valores menores na introdução de soluções de vidro com reflexão solar, casos 8 a 12 e 15.

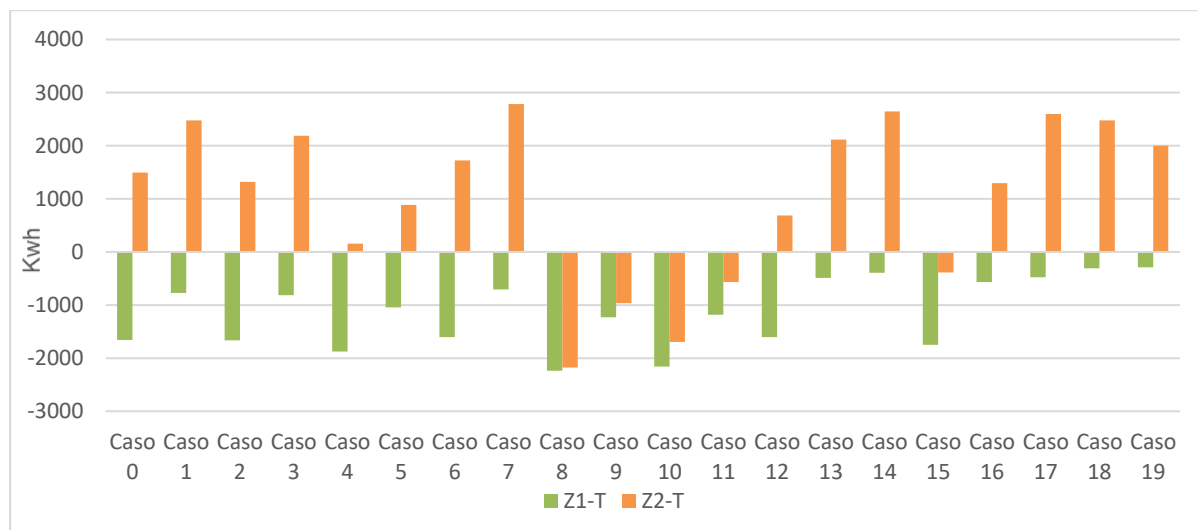


Figura 4.25: Gráfico de Balanço Energético - Período de Aquecimento -Bragança-30%

Como se tem vindo a registar nas simulações da região de Bragança os casos favoráveis tornam a ser o caso 19 para a zona (-287,282 kWh) térmica 1 e o 7 (2782,18 kWh) para a zona térmica 2, soluções de sistemas triplo e duplo respetivamente. O caso 8, que potencializa a reflexão é de novo o mais

prejudicial, seguido pelo caso 10 que também é um vidro de reflexão, mas com película de estanho. Os valores obtidos para as zonas térmicas 1 e 2 são de -2236,52 kWh e de -2178,79.

Na análise do balanço energético no período de arrefecimento através da Figura 4.26 é possível observar o comportamento das soluções de janela na estação de arrefecimento obtendo valores mais positivos devido à existência de menores perdas, alcançando melhores resultados para as soluções que propiciem a diminuição da transmissão do calor para o interior da fração.

O caso 8 é para ambas as zonas térmicas 1 e 2 o caso mais vantajoso com valores de -592,43 kWh e -131,387 kWh respetivamente. O caso 10 apresenta também valores a ter em consideração apesar de apresentar um valor positivo para a zona 2.

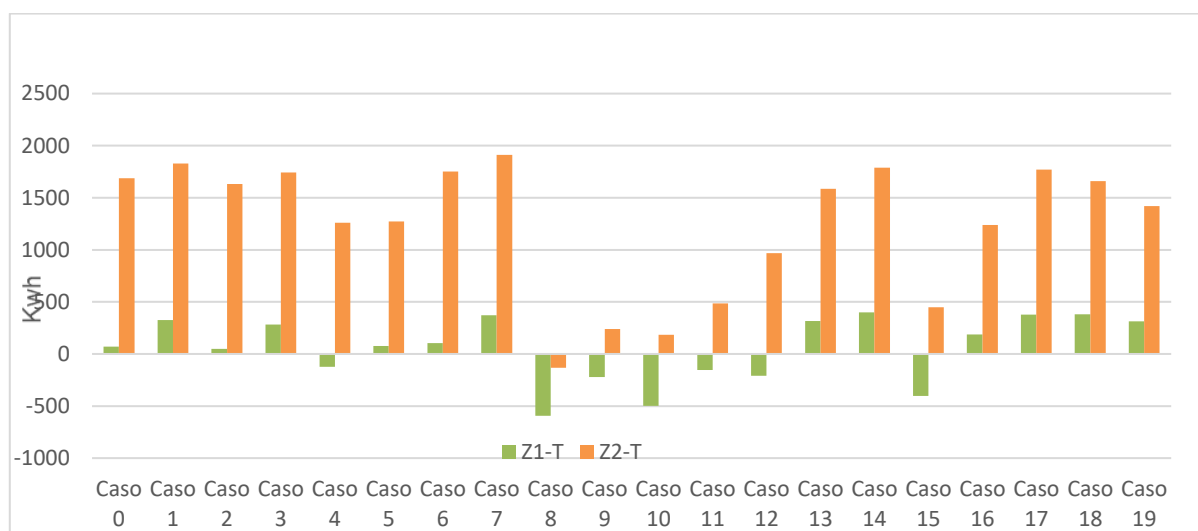


Figura 4.26: Gráfico de Balanço Energético - Período de Arrefecimento -Bragança-30%

Em relação aos casos desfavoráveis são registados como os mais prejudiciais o caso 14 e o caso 7 para as zonas térmicas 1 e 2. Os valores obtidos foram para o caso 14 de 399,759 kWh e de 1911 para o caso 7.

4.3.2 Conforto térmico

A análise do conforto térmico foi feita analisando as horas de desconforto calculadas pelo EnergyPlus que utiliza os conceitos do ASHRAE 55-2004 e através destes apresenta um valor para a fração em horas de desconforto. Através da análise da Figura 4.27 é possível observar, tal como tem sido recorrente nas regiões anteriores a existência de uma separação entre as simulações de 25% e 30% com a de 15%, podendo afirmar que as janelas possuem uma influência significativa no conforto térmico interior.

De acordo com os valores obtidos no gráfico a solução com menores valores de horas de desconforto é a solução 14 possuindo um valor menor de 3154,5h para a área de envidraçado de 30% que é

superior ao mínimo recomendado de 80% de aceitabilidade, o que leva a concluir que na região de Bragança só a alteração do vidro não garante o conforto térmico interior.

Para as simulações de 15% e 25% de área o caso que apresenta a melhor solução é o caso 7.

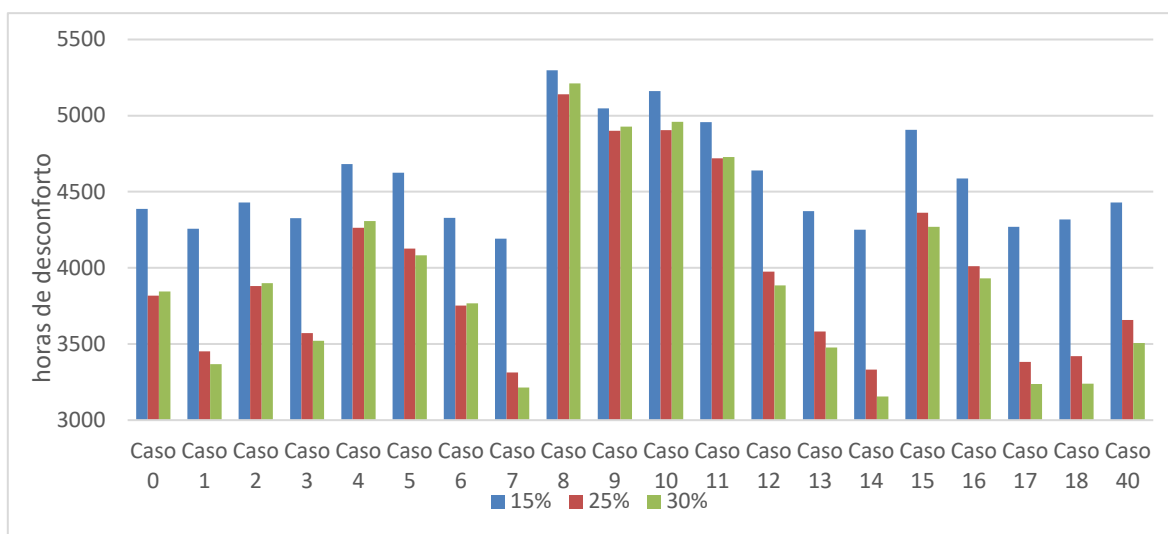


Figura 4.27: Gráfico de Conforto Térmico Interior -Bragança

4.3.3 Necessidades de Aquecimento e Arrefecimento

As necessidades de aquecimento da região de Bragança são elevadas, devido a zona climática em que se insere obtendo comportamentos semelhantes para as três simulações de área de vidro excetuando na zona mais à direita da Figura 4.28 onde as simulações de 15% assumem maiores valores de necessidades devidas ao seu menor vão envidraçado.

Obtém-se melhores comportamentos nas soluções que possuem um melhor conforto habitacional e balanço energético no período de aquecimento, como é o caso da solução 7 e da solução 14 que obtém valores menores.

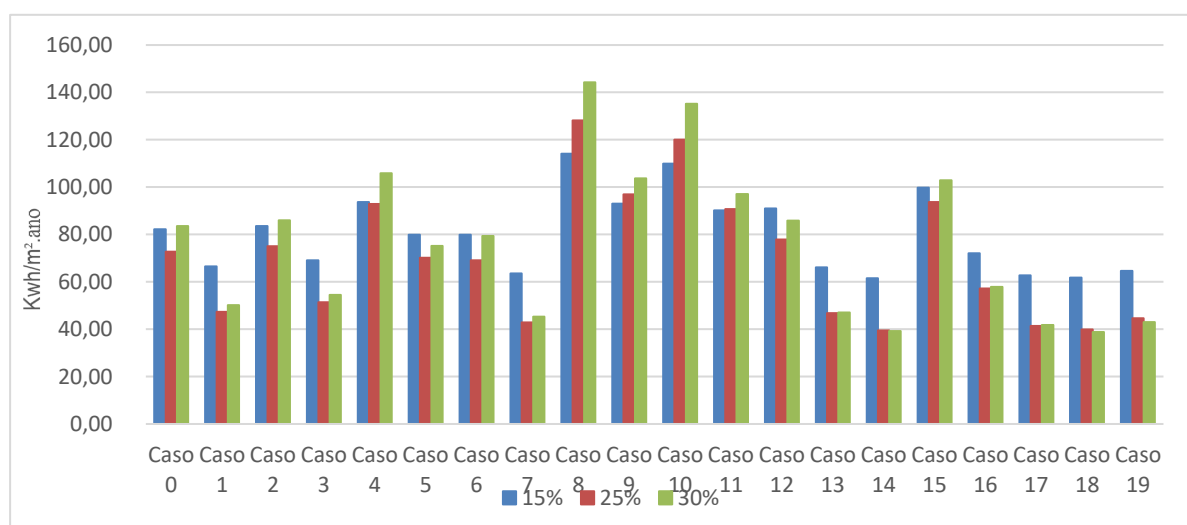


Figura 4.28: Necessidades de Aquecimento Totais-Bragança

Na estação de arrefecimento representada na Figura 4.29 é notória a diferença entre as simulações de 25% e 30% com a simulação de 15% que possui valores menores de necessidades de arrefecimento devido á sua menor área mantendo a habitação mais fresca.

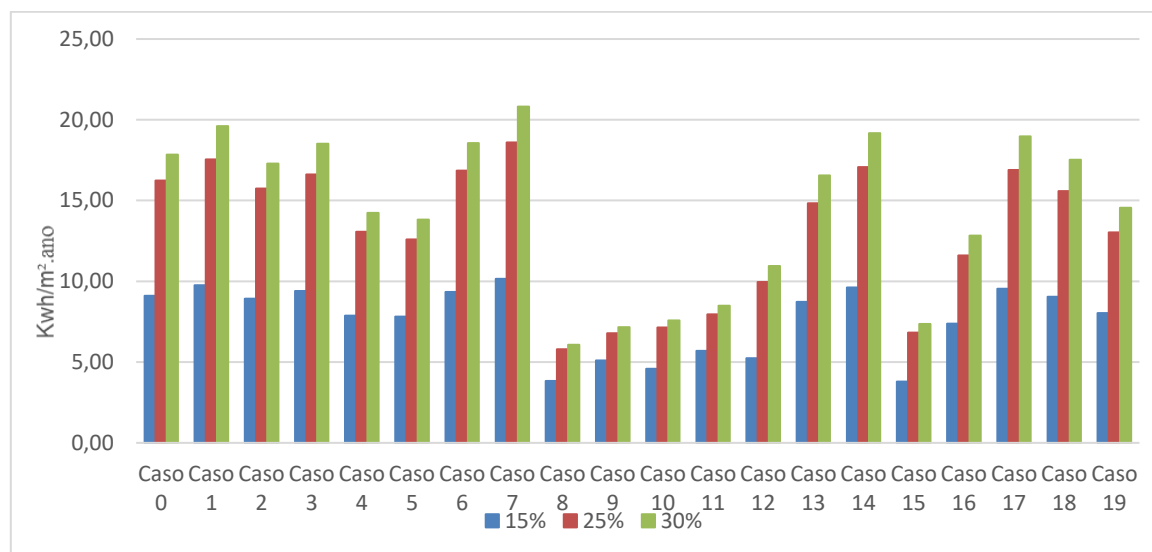


Figura 4.29: Necessidades de Arrefecimento Totais-Bragança

A solução 15 é a mais eficiente contendo um valor de 3,79 kWh/m² para os vãos envidraçados de 15% podendo concluir que no arrefecimento a zona térmica que causa mais necessidades de aquecimento é a zona 2 por possuir uma fachada a Sul e outra a Oeste.

4.4 Custo ótimo de ciclo de vida

Para a avaliação do custo ótimo de ciclo de vida foram analisadas 8 soluções (Figura 4.30), que tal como anteriormente referido cumprissem o valor de coeficiente de transmissão térmica da zona climática.

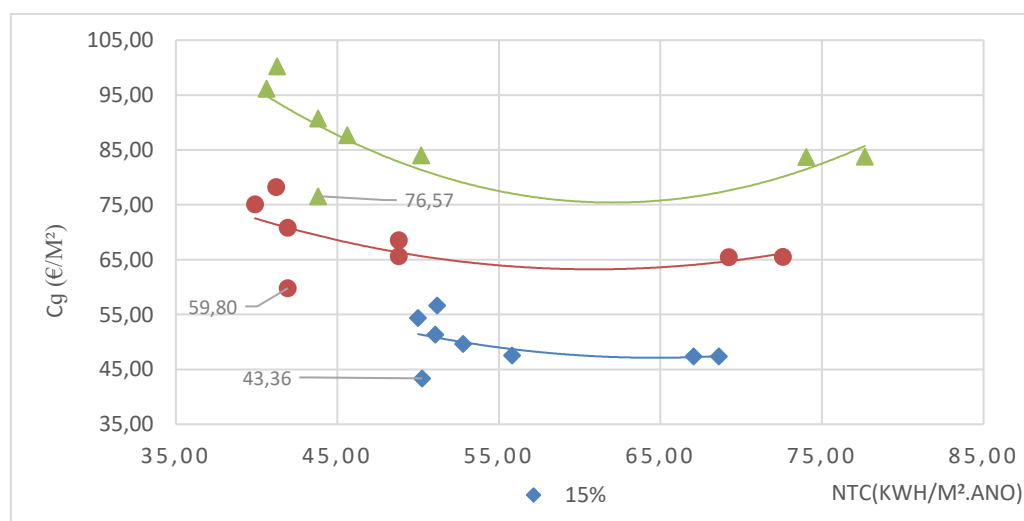


Figura 4.30: Análise do Custo Ótimo -Bragança

Obteve-se como melhor solução de custo para região de Bragança a solução 14 composta por um sistema duplo de vidro simples e de low-e de 3mm que possuem entre eles um espaço de ar de 14mm. É uma solução que não melhora drasticamente a estação de aquecimento.

A maioria das soluções encontram-se à direita das soluções ótimas possuindo maiores valores de energia primária. Apenas nos casos 18 para as três simulações e 18 e 19 para as simulações de 25% e 30% apresentam valores de necessidades de energia primária inferiores ao da solução de custo ótima.

Tabela 4.3: Valores de Melhoria da solução de Custo Ótimo

| | Nic | Nvc | Melhoria (%) | |
|------------------|-------|-------|--------------|--------|
| | | | Nic | Nvc |
| Caso 14 (15%) | 61,53 | 9,62 | 25,16% | -5,73% |
| Caso 14 (25%) | 39,54 | 17,06 | 45,63% | -5,03% |
| Caso 14 (30%) | 39,27 | 19,18 | 52,99% | -7,48% |

4.5 Comparação regiões

Área de Vão Envidraçado -15%

Ao comparar as necessidades de aquecimento das várias regiões para a simulação de 15% de área de envidraçado, é possível analisar através da Figura 4.31 que a região de Bragança se distancia consideravelmente das soluções de Lisboa e Coimbra. Bragança regista valores mais elevados de necessidades de aquecimento. Tal acontece devido às temperaturas mais reduzidas da região, o que proporciona uma maior diferença entre o interior da fração e o exterior, potencializando as perdas térmicas e, diminuindo os valores positivos de balanço energético.

Já as soluções de Lisboa e Coimbra produzem valores semelhantes, apesar da região de Lisboa apresentar melhores resultados, independentemente do caso em análise. Esta situação ocorre devido à localização climática de Lisboa ser a mais favorável.

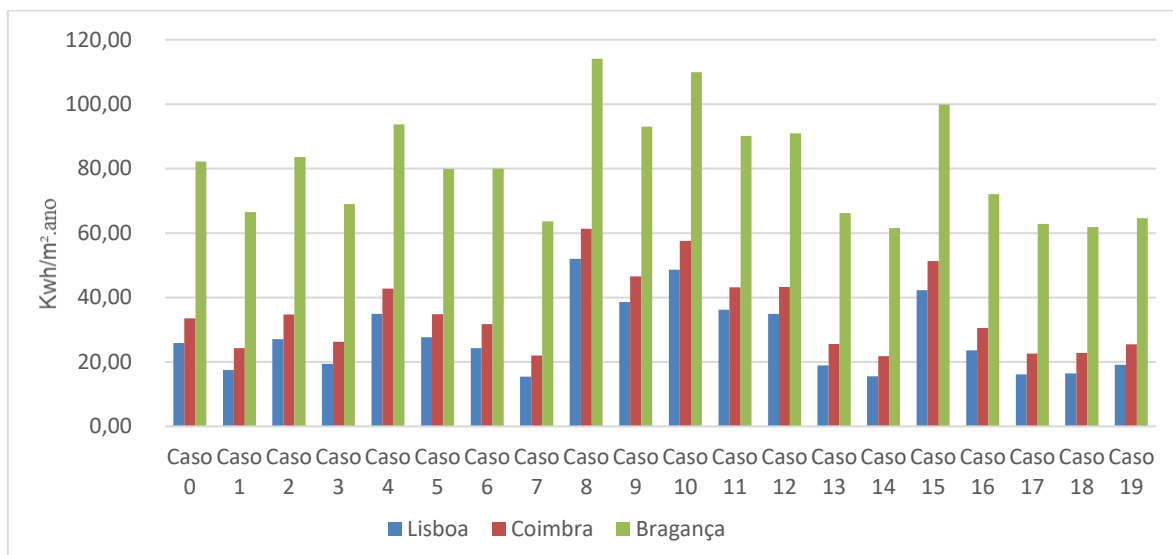


Figura 4.31: Necessidades de Aquecimento Totais-15%

Nas necessidades de arrefecimento (Figura 4.32) o inverso ocorre, sendo a região de Lisboa a que possui maiores valores de necessidades, aproximando-se dos valores de Bragança nos casos 8 e 15. A diminuição das necessidades de arrefecimento nas duas soluções é devido às suas características, visto que possuem no caso 8 um vidro de reflexão à base de aço inoxidável e no caso 15, um vidro de baixa emissividade de espectro seletivo. Refere-se ainda que a solução de Lisboa apresenta valores superiores de arrefecimento devido à sua localização climática.

Em comparação com a solução de aquecimento as necessidades de arrefecimento são menores não atingindo em nenhuma das análises efetuadas os 18 kWh/m². ano. É também visível que a simulação que produz melhores resultados é a de Coimbra, não distando consideravelmente dos casos de Bragança.

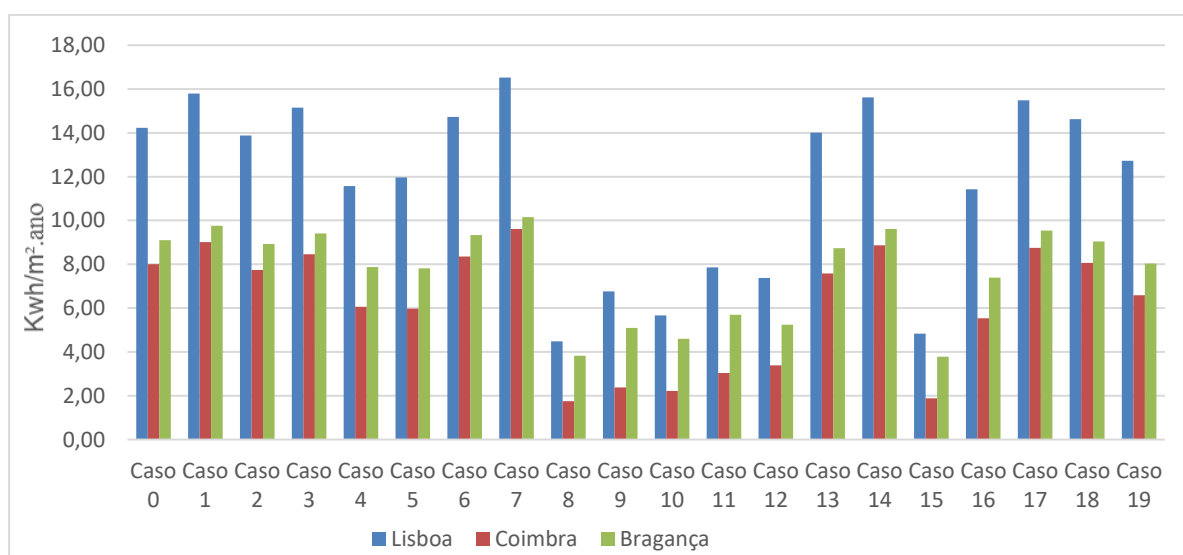


Figura 4.32: Necessidades de Arrefecimento Totais-15%

A nível do conforto habitacional é possível observar através da Figura 4.33 que Lisboa é a região que produz valores mais eficientes a nível do conforto térmico, seguida por Coimbra e Bragança. O comportamento climático das regiões afeta o conforto térmico no sentido em que, quanto mais fria for a região maior é a diferença entre o interior e o exterior induzindo mais perdas do que ganhos. Os valores de menor de horas de desconforto são pertencentes a soluções que captem mais ganhos na estação de aquecimento, período que condiciona maioritariamente o conforto.

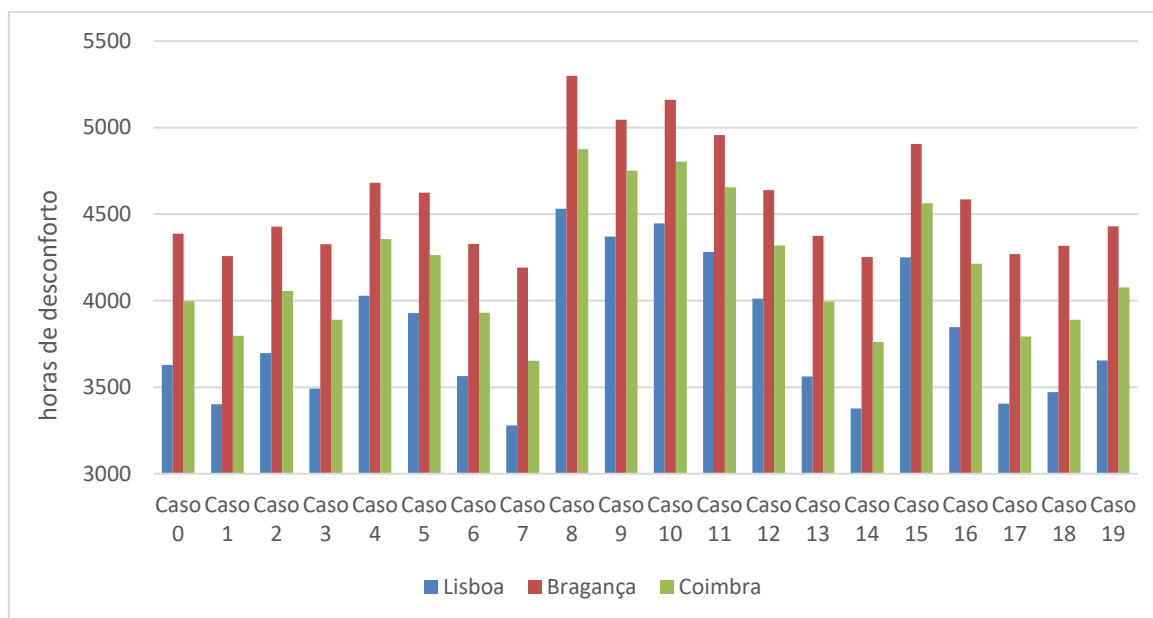


Figura 4.33: Gráfico de Conforto Térmico Interior - 15%

Área de Vão Envidraçado -25%

Para as simulações de 25% foi, tal como referido anteriormente, verificado o mesmo tipo de comportamento para cada região como se observa através das Figura 4.34 e Figura 4.35.

Comparando com os valores obtidos na simulação de 15% são apresentados valores menores de necessidades de aquecimento nas soluções que sejam vantajosas para a captação de ganhos solares. Os resultados das soluções com maior reflexão ou baixa emissividade de espetro seletivo apresentam valores superiores aos encontrados nas simulações de 15%, as alterações ocorrem por se estar a analisar vãos com uma área superior (25%).

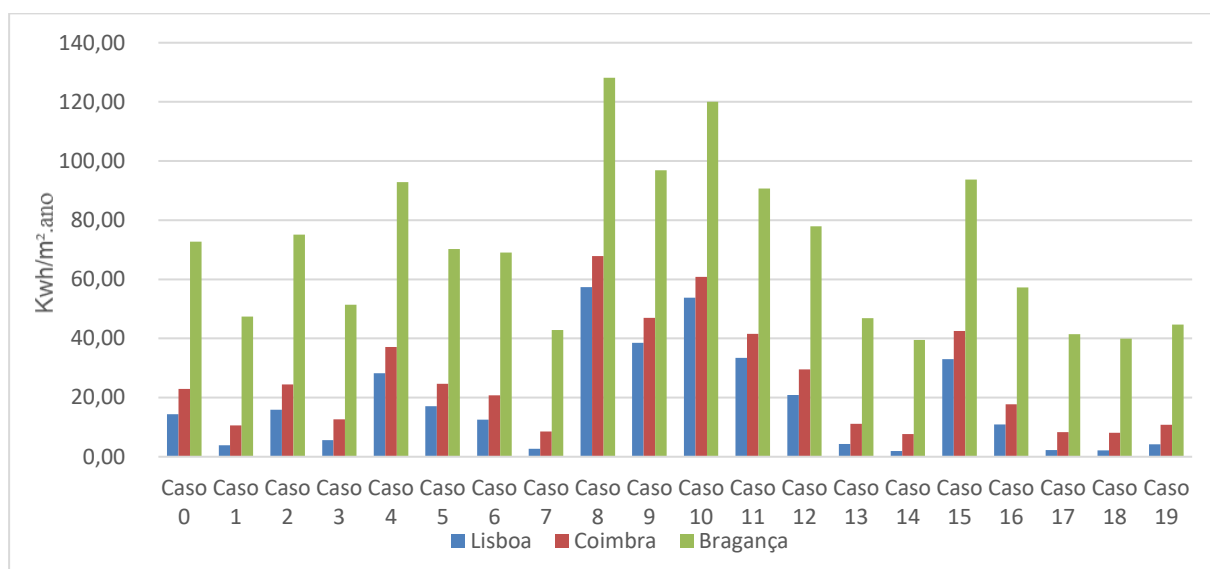


Figura 4.34: Necessidades de Aquecimento Totais -25%

O inverso acontece na análise das necessidades de arrefecimento, onde os casos com melhor capacidade de captação de ganhos apresentam valores superiores aos das simulações de 15%. Já as soluções que impedem a passagem total da radiação incidente obtêm valores menores que os registados nas simulações anteriores.

Com o aumento da área de vãos a região de Bragança assume os valores menores com exceção dos casos de reflexão (caso 8 a 11 e caso 15). As regiões de Coimbra e Bragança apresentam valores menores de necessidades de arrefecimento devido ao seu clima, não existindo uma grande diferença entre a temperatura exterior e interior, excetuando os dias de pico de temperatura o que não induz a uma transferência de calor tão elevada como na região de Lisboa, onde a temperatura exterior assume valores mais elevados.

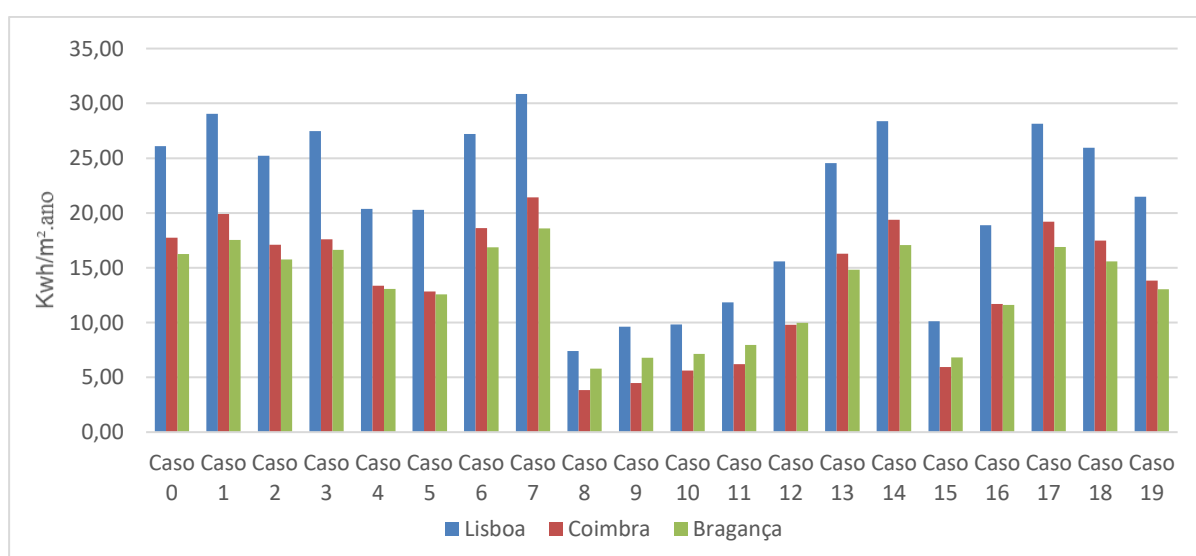


Figura 4.35: Necessidades de Arrefecimento Totais-25%

Em relação ao conforto habitacional exposto na Figura 4.36 é visível uma melhoria nos valores de horas de desconforto para as três regiões. A melhoria deve-se à existência de uma maior superfície de captação solar, possuindo as janelas uma influência relevante no conforto térmico interior.

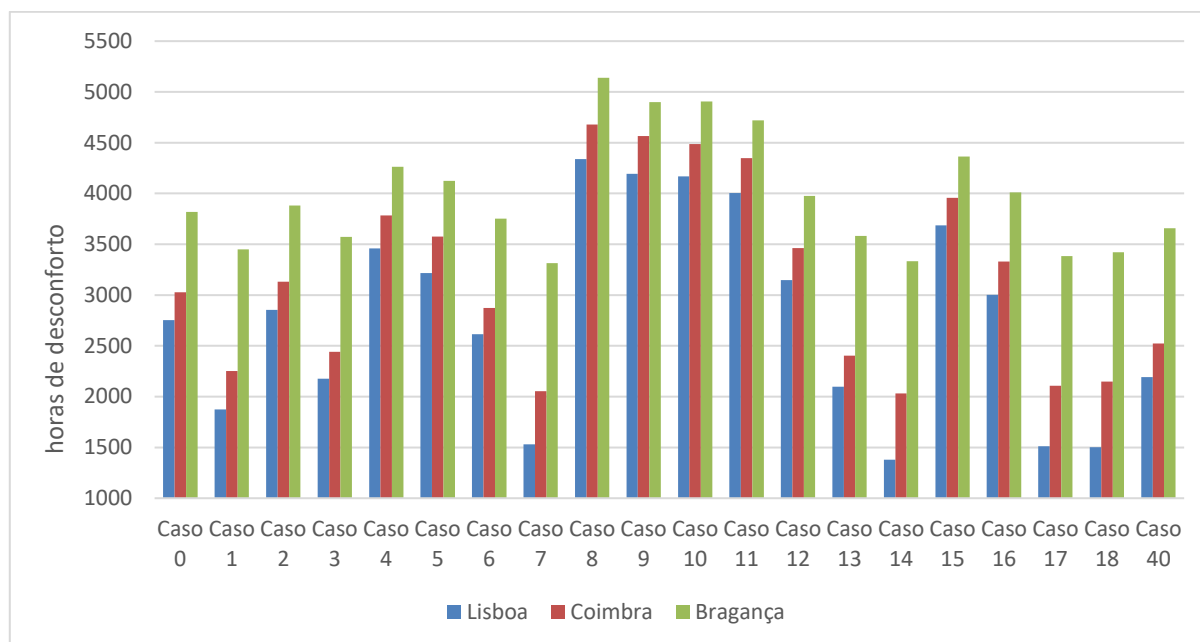


Figura 4.36: Gráfico de Conforto térmico Interior-25%

A região de Lisboa tal como anteriormente referido é a zona que produz valores mais eficientes devido ao seu clima menos agressivo, no período de aquecimento que nas restantes regiões sendo que os casos que apresentam melhores valores são as soluções que beneficiam a estação de aquecimento.

Os casos 7, 14, 17 e 18 são só casos que cumprem o limite das 1752 horas, apresentando um maior nível de conforto que os restantes. Vendo o caso 14, aquele que regista um valor menor de 1380,5h.

Área de Vão Envidraçado -30%

A análise efetuada para a simulação de 30% (Figura 4.37) é igual à efetuada para as restantes simulações possuindo para a estação de aquecimento valores na região de Bragança superiores aos obtidos nas regiões de Lisboa e Coimbra por pertencer a uma zona climática I3.

Todas as regiões registam valores superiores às áreas de envidraçado 15% e 25% nas soluções que têm um comportamento desfavorável no período de aquecimento (caso 8 a 11e 15).

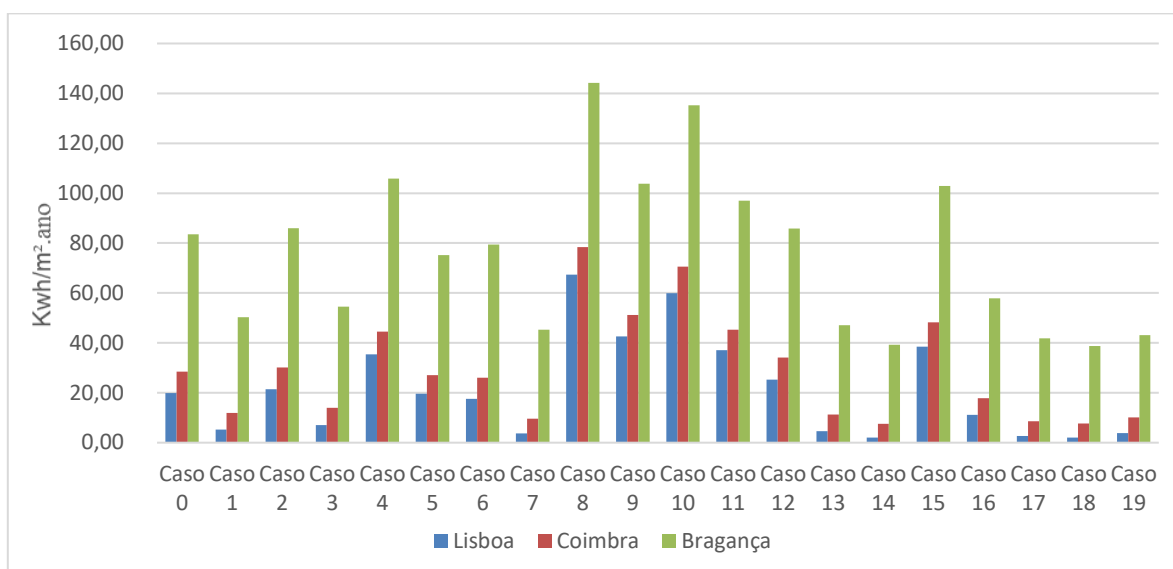


Figura 4.37: Necessidades de Aquecimento Totais-30%

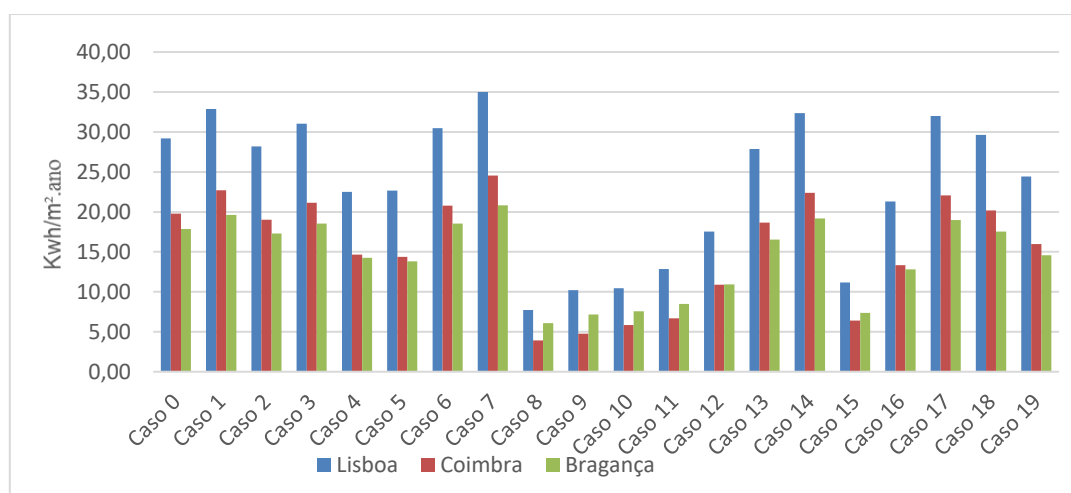


Figura 4.38: Necessidades de Arrefecimento Totais-30%

Já em estação de arrefecimento (Figura 4.38) a região de Bragança produz valores menores sendo semelhante no seu comportamento às soluções de Coimbra, registando a região Lisboa valores de necessidades mais elevados devido à zona climática.

O caso 8 volta a ser o que regista os valores mais favoráveis para as três regiões possuindo valores mais baixos que 8 kWh/m². ano, apresentando uma diferença do caso base (caso 0) maior que 10 kWh/m². ano, apresentando melhorias significativas para o período de arrefecimento.

Na simulação de 30% é onde se obtêm as melhores situações de conforto habitacional pelo que uma maior área de envidraçado potencializa, para soluções que melhorem a eficiência energética no período de aquecimento o conforto, atingido valores mais satisfatórios segundo a metodologia de ASHRAE. Conforme se pode analisar na Figura 4.39 a solução de Lisboa por possuir um clima mais ameno, em período de aquecimento, em comparação com as restantes regiões é aquela que obtêm menores horas

de desconforto. As regiões de Bragança e Coimbra apesar de possuírem valores menores que nas análises com área de vão inferior continuam sem garantir o mínimo de 1752h.

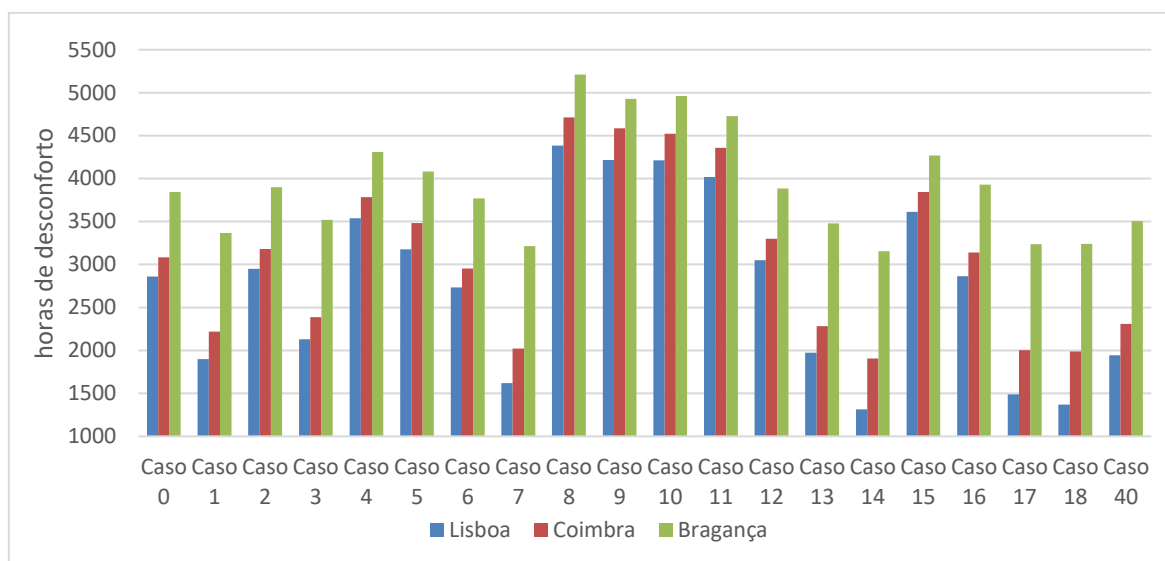


Figura 4.39: Gráfico de Conforto Térmico Interior -30%

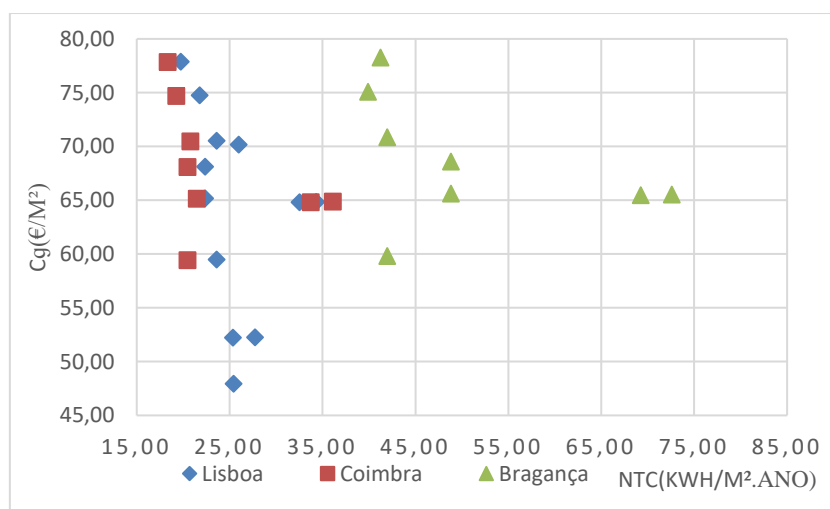
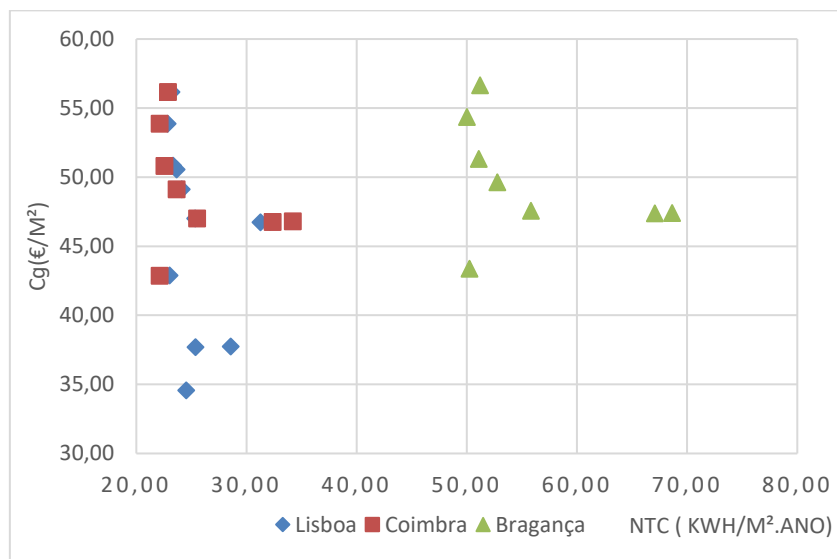
4.5.1 Custo Ótimo

Nas Figuras 4.40, Figura 4.41 e Figura 4.42 é possível observar a dispersão das várias soluções analisadas nas regiões de Lisboa, Coimbra e Bragança. Como seria de esperar as soluções encontram-se maioritariamente na zona mais à esquerda do gráfico onde se encontra menores valores de energia primária o que leva a soluções mais eficientes.

É também de notar que as soluções que se encontram mais a direita dos gráficos são maioritariamente soluções de Bragança que possuem maiores valores de energia primária por registarem valores de necessidades de aquecimento e arrefecimento superiores aos restantes.

É importante referir que independentemente da área de envidraçado, a generalidade das soluções de Coimbra apresenta, menores valores de necessidades de energia primária que as restantes regiões. A causa provável desta situação é a existência de valores de necessidades de arrefecimento menores que contribuem para uma redução no valor de energia primária.

As soluções de área de vãos de 25% e 30% apresentam menores valores de necessidades de energia primária devido as suas maiores áreas de envidraçado, originando de menores valores de necessidades de aquecimento ou arrefecimento dependendo dos casos em análise.



Conclui-se ainda que as soluções estudadas apesar de apresentarem valores de baixa necessidades de energia primária para as regiões de Lisboa e Coimbra, apresentam valores muito elevados para as soluções de Bragança. O resultado da mudança dos sistemas de janelas para a região de Bragança seria pouco benéfico considerando o gasto versus o benefício das soluções aplicadas a longo prazo.

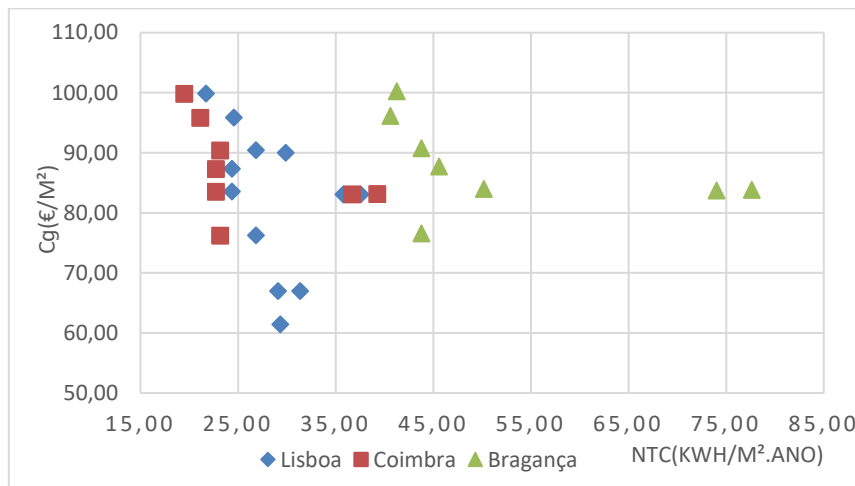


Figura 4.42: Análise de Custo Ótimo -30%

Otimização da Solução de Lisboa - Conforto Térmico

Optou-se ainda por fazer uma análise de custo às soluções de Lisboa que não ultrapassem o máximo imposto das 1752h de desconforto, nomeadamente, os casos das simulações de 25% e 30%. Foram obtidas quatro soluções para cada uma das diferentes áreas de envidraçado, compostas pelos casos 7, 14, 17 e 18, como mostra a Figura 4.43. Todas as soluções obtidas apresentam bons comportamentos para a estação de aquecimento, principalmente na zona térmica 2.

Conforme é possível observar na Figura 4.43, as soluções encontram-se igualmente dispersas, possuindo as soluções de menor área valores mais reduzidos de custo global e de necessidades de energia primária.

A solução que apresenta o custo ótimo de ambas as simulações é o caso 14, com um custo global de 59,47 €/m² e 76,27 €/m² para 25% e 30% de área de envidraçado, respetivamente. Os casos registam valores superiores em 11,55 €/m² (simulação 25%) e 14,83 €/m² (simulação 30%) em comparação com o Caso 1 (vd. anexo I). A diferença de custo é um fator a ter em conta na escolha das soluções, mas a ponderação dos benefícios a longo prazo é crucial, visto que o caso 14 possui necessidades de energia primária menores que o caso 1.

É importante ainda referir que a solução 14 apresenta melhores resultados em termos de necessidades energéticas que o caso 1, melhorando em quase 90% o período de aquecimento. Em termos de arrefecimento verifica-se um ligeiro aumento das necessidades na ordem dos 10%. Apenas o caso 18 apresenta necessidades de energia primária inferiores à do caso 14, mas a um custo por m² muito mais elevado o que torna a solução inviável.

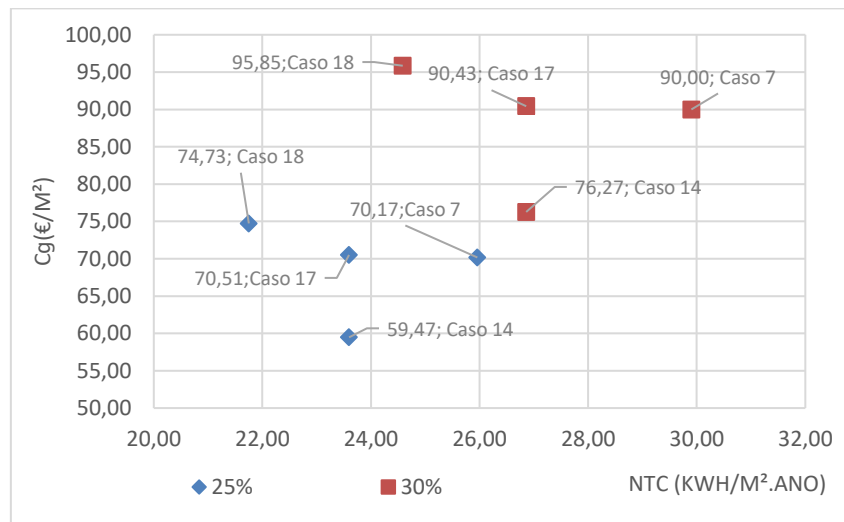


Figura 4.43: Análise do Custo Ótimo- Soluções de Conforto- Lisboa

O conforto térmico deverá ser um dos fatores mais importantes a considerar pois apesar de as soluções passarem na regulamentação existente se o conforto não é garantido os gastos durante a utilização vão ser superiores aos previstos em fase de análise. É de salientar que o conforto térmico vai ser dependente ainda de fatores como a ventilação, a quantidade de roupa e nível de atividade dos utilizadores do espaço em análise.

5 Conclusões

O objetivo principal da dissertação foi a simulação de sistemas de envidraçados que possam ser adaptados em frações habitacionais, com o objetivo de analisar o seu custo ótimo. Avaliou-se a sua importância e influência no equilíbrio térmico habitacional através da observação dos balanços térmicos, necessidades de aquecimento e arrefecimento e, conforto térmico interior.

Em relação aos balanços térmicos foi concluído que quanto maior for a área de vão envidraçado maior são os ganhos e perdas de calor habitacional. Sendo as melhores soluções aquelas que potencializam os ganhos em período de aquecimento e as perdas em período de arrefecimento. As soluções obtidas como as mais eficientes mantiveram-se maioritariamente constantes ao longo de todas as simulações efetuadas para todas as regiões, como se previa. O caso 7 foi aquele que mais se evidenciou para a zona climática 2, por possuir características de elevada captação de ganhos solares e, por apresentar valores elevados de transmissão luminosa e fator solar. Já os casos 18 e 19 foram os que apresentaram melhores características para a zona térmica 1. Tal ocorre devido à orientação dos vãos, o que leva a concluir que a orientação dos envidraçados é um fator de grande importância na elaboração de projetos podendo alterar significativamente o comportamento da fração. O caso 8 foi aquele que apresentou durante todo o documento valores de melhor comportamento na estação de arrefecimento para ambas as zonas em análise, tal se deve às suas características de reflexão que impedem a entrada de ganhos solares.

As necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento obtiveram comportamentos de acordo com os balanços energéticos. As soluções com maiores ganhos solares em período de aquecimento, apresentam menores necessidades de aquecimento e o inverso ocorre no período de arrefecimento, onde os casos com maiores perdas são os com menores valores de gastos de energia. A variação conforme a área de envidraçado foi a esperada, possuindo a área de 30% os melhores valores para o período de aquecimento e a de 15% os melhores resultados para o arrefecimento.

Através da aplicação de várias soluções com diferentes áreas de atuação e em várias zonas climáticas a conclusão a que se chega é que as soluções ótimas, obtidas na primeira análise de ciclo de vida, apesar de garantirem as condições impostas pelo REH não cumprem com o conforto térmico interior, havendo um número elevado de horas em desconforto pelo que, a alteração única do sistema de janelas não é suficiente para os casos ótimos obtidos. Conclui-se nesta análise, que a melhor região para a fração é Lisboa, com a solução ótima caso 1 e a área de envidraçado de 30%. Apesar de a mesma não cumprir os valores máximos de horas de desconforto.

É relevante mencionar que o facto de uma das fachadas de maior envidraçado estar orientada a norte prejudica a avaliação global da habitação. Por não possuir a mesma exposição solar que as outras fachadas, não ocorrem variações significativas na zona térmica 1, independentemente do caso em estudo. Apesar de se verificar que a zona térmica 1 não possui alterações significativas, a substituição dos seus envidraçados afeta o comportamento global da fração, assim apesar de não melhorar a zona

consideravelmente como elemento individual pesa no comportamento de toda a fração e no seu consumo energético.

Conclui-se ainda que a melhor opção para a fração em análise seria a utilização de sistemas diferentes para cada uma das fachadas pois a fachada norte não possui as mesmas necessidades que a fachada a Sul e Oeste sendo mais vantajoso económica e energeticamente apostar em soluções mais que sejam mais eficazes para a fachada norte.

Para a garantia do conforto térmico interior selecionou-se dentro das soluções que verificassem os coeficientes de referência imposto no REH as soluções que garantem o conforto térmico. A avaliação de custo ótimo foi efetuada analisando apenas quatro soluções para áreas de vidro de 30% e 25%, para a região de Lisboa, sendo estas as únicas que garantiam o conforto. Apesar de serem mais dispendiosas, garantem o conforto que as outras soluções não conseguem e apresentam menores valores de energia primária, que os casos considerados como ótimos na análise de custo anterior. O caso 14 foi aquele que se destacou dos quatro analisados, apresentando menores consumos que o caso 1 e melhorias mais elevadas. Como a análise custo-benefício apenas avalia a energia primária com o custo de cada solução, esta não garante o conforto térmico da solução ótima, que foi o que acabou por acontecer nas soluções obtidas em primeira fase assim, torna-se necessário começar a formar as análises de custo com um número maiores de parâmetros que possam garantir uma melhor utilização do espaço projetado.

Em suma, as janelas são sistemas dispendiosos, mas que através de uma análise da orientação, necessidades e definindo os parâmetros de conforto da habitação podem melhorar consideravelmente o conforto e a utilização do espaço diminuindo os gastos energéticos consideravelmente.

5.1 Trabalhos futuros

Devido ao aumento das áreas de vidro em fachadas, no sector da construção, este é um tema que propícia o desenvolvimento de diversos trabalhos futuros por não ser uma área ainda demasiado explorada.

Como seguimento da presente dissertação é possível sugerir os seguintes trabalhos futuros:

- Estudo de diferentes gases nas câmaras entre os panos de vidro e comparação com resultados obtidos no presente documento;
- Analisar a utilização de diferentes soluções de envidraçado na fração para cada zona térmica;
- Alteração do tipo de caixilho e sombreamento;
- Otimização dos horários de HAVAC bem como análises de sensibilidade;
- Garantir soluções de conforto ótimo e aplicar em análises de custo ótimo;
- Aplicação da metodologia apresentada num edifício típico médio português para ser usado como base de comparação no país.

6 Bibliografia

- [1] Diretiva 2010/31/UE (recast) - Publicada pela UE (maio de 2010)
- [2] Dgeg - <http://www.dgeg.pt/>
- [3] História das janelas-<https://www.britannica.com/technology/window>
- [4] Faria, P- Sebenta Introdução aos Revestimentos na construção - Tecnologias dos Revestimentos FCT-UNL
- [5] Imagem de tipologia de janelas - <http://coisasdacasa.blogspot.pt/2007/09/janelas-tipos-de-abertura.html>
- [6] Sirgado, J.F. - Análise do impacte dos vãos envidraçados no desempenho térmico dos edifícios, Tese de Mestrado em Eng. Civil, Instituto Superior Técnico, (Lisboa, 2010)
- [7] Gases de preenchimento -<http://www.efficientwindows.org/gasfills.php>
- [8] Gases de preenchimento - <https://modernize.com/home-ideas/34308/argon-krypton-xenon-best-gas-insulated-window>
- [9] Henriques, F.- Comportamento Higrotérmico de Edifícios FCT-UNL (julho 2011)
- [10] SHGC, VT, U - <http://www.commercialwindows.org/vt.php>
- [11] Rodrigues, A.; Canha da Piedade, A.; Braga, A. M. Térmica de Edifícios, Lisboa: Edições Orion, (Lisboa, março de 2009)
- [12] Ramalheira, F. Manual de boas práticas de escolha de vãos envidraçados – Exigências funcionais de vãos envidraçados, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia do Porto, Porto, Portugal, (2005)
- [13] Aelenei, D - REH Light, FCT-UNL- (março 2016)
- [14] Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. Energyplus Engineering Reference, US Department of Energy, (EUA, 2009)
- [15] EnergyPlus- <https://energyplus.net/>
- [16] EnergyPlus v8.6 Documentation - EnergyPlus InputOutput References (setembro 2016)
- [17] EnergyPlus v8.6 Documentation – EnergyPlus Output Details and Example (setembro 2016)
- [18] ASHRAE 55-2010 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy

- [19] Metodologia Custo Ótimo -Regulamento No. 244,/2012 complemento da Diretiva 2010/31/UE (recast) (janeiro 2012)
- [20] Imagem da exposição solar-<https://www.electronica-pt.com/instalacao-sistema-fotovoltaico>
- [21] Clima - https://energyplus.net/weather-region/europe_wmo_region_6
- [22] Pina dos Santos, C; Matias, L- ITE-50- Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios, (Lisboa 2006)
- [23] ISO/DIS 10077-1- Thermal performance of Windows, doors and shutters – Calculation of Thermal Transmittance.
- [24] Kurnitski, J- How to calculate cost optimal nZEB energy performance (outubro 2011)
- [25] Janela típica Europa (Idade Média) – Chambers, R – *Domestic annals of Scotland from the Reformation to the Revolution (1859)*
- [26] Janela Francesa - Fotografia original de *Charles Chusseau Flaviens* exposta e retirada de *George Eastman Museum* (<https://www.eastman.org/>)
- [27] Costa, F - Desempenho energético de edifícios residenciais no contexto da regulamentação térmica com recurso ao Energy Plus e TRNSYS, Tese de Mestrado em Eng. Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia (Lisboa, janeiro 2012)
- [28] Costa, L J – Edifícios NZEB, Estudo de conversão de hotel, Tese de Mestrado em Eng.Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia (Lisboa, julho 2016)
- [29] Taxa residual portuguesa - <http://www.bportugal.pt>
- [30] Gerador de preços – CYPE - <http://www.geradordeprecos.info/>

Anexos

ANEXO I - Valores de Cálculo de Custo Ótimo

Tabela A.1: Valores de Custo global- Soluções de Lisboa

| 15% | | | 25% | | | 30% | | |
|---------|--------------------------------------|---------------------------|---------|--------------------------------------|---------------------------|---------|--------------------------------------|---------------------------|
| Casos | Ntc (kWh/m ² . ano) | Cg (€/m ²) | Casos | Ntc (kWh/m ² . ano) | Cg (€/m ²) | Casos | Ntc (kWh/m ² . ano) | Cg (€/m ²) |
| Caso 18 | 22,84 | 53,88 | Caso 19 | 19,74 | 77,87 | Caso 19 | 21,73 | 99,87 |
| Caso 14 | 22,99 | 42,88 | Caso 18 | 21,75 | 74,73 | Caso 13 | 24,39 | 87,33 |
| Caso 19 | 23,18 | 56,16 | Caso 13 | 22,35 | 68,10 | Caso 16 | 24,39 | 83,53 |
| Caso 17 | 23,33 | 50,82 | Caso 16 | 22,35 | 65,15 | Caso 18 | 24,59 | 95,85 |
| Caso 7 | 23,64 | 50,55 | Caso 14 | 23,60 | 59,47 | Caso 14 | 26,86 | 76,27 |
| Caso 13 | 24,12 | 49,12 | Caso 17 | 23,60 | 70,51 | Caso 17 | 26,86 | 90,43 |
| Caso 1 | 24,53 | 34,57 | Caso 3 | 25,35 | 52,23 | Caso 3 | 29,10 | 66,97 |
| Caso 16 | 25,33 | 47,02 | Caso 1 | 25,42 | 47,92 | Caso 1 | 29,32 | 61,44 |
| Caso 3 | 25,35 | 37,69 | Caso 7 | 25,96 | 70,17 | Caso 7 | 29,90 | 90,00 |
| Caso 5 | 28,57 | 37,73 | Caso 5 | 27,73 | 52,25 | Caso 5 | 31,37 | 66,99 |
| Caso 11 | 31,27 | 46,74 | Caso 11 | 32,50 | 64,79 | Caso 11 | 35,79 | 83,05 |
| Caso 9 | 32,09 | 46,75 | Caso 9 | 34,29 | 64,82 | Caso 9 | 37,58 | 83,08 |

Tabela A.2: Valores de Custo global- Soluções de Lisboa

| 15% | | | 25% | | | 30% | | |
|---------|--------------------------------------|---------------------------|---------|--------------------------------------|---------------------------|---------|--------------------------------------|---------------------------|
| Casos | Ntc (kWh/m ² .a no) | Cg (€/m ²) | Casos | Ntc (kWh/m ² . ano) | Cg (€/m ²) | Casos | Ntc (kWh/m ² .a no) | Cg (€/m ²) |
| Caso 14 | 22,09 | 42,86 | Caso 19 | 18,32 | 77,84 | Caso 19 | 19,51 | 99,83 |
| Caso 18 | 22,10 | 53,86 | Caso 18 | 19,26 | 74,69 | Caso 18 | 21,13 | 95,79 |
| Caso 17 | 22,53 | 50,81 | Caso 13 | 20,44 | 68,07 | Caso 13 | 22,75 | 87,30 |
| Caso 19 | 22,87 | 56,16 | Caso 14 | 20,45 | 59,42 | Caso 16 | 22,75 | 83,50 |
| Caso 13 | 23,65 | 49,11 | Caso 17 | 20,76 | 70,46 | Caso 14 | 23,18 | 76,20 |
| Caso 16 | 25,51 | 47,02 | Caso 16 | 21,44 | 65,13 | Caso 17 | 23,18 | 90,37 |
| Caso 11 | 32,36 | 46,76 | Caso 11 | 33,73 | 64,81 | Caso 11 | 36,69 | 83,06 |
| Caso 9 | 34,18 | 46,79 | Caso 9 | 36,11 | 64,86 | Caso 9 | 39,27 | 83,11 |

Tabela A.3: Valores de Custo global- Soluções de Lisboa

| 15% | | | 25% | | | 30% | | |
|---------|----------------------------------|---------------------------|---------|----------------------------------|---------------------------|---------|----------------------------------|---------------------------|
| Casos | Ntc (kWh/m ² .ano) | Cg (€/m ²) | Casos | Ntc (kWh/m ² .ano) | Cg (€/m ²) | Casos | Ntc (kWh/m ² .ano) | Cg (€/m ²) |
| Caso 18 | 50,00 | 54,36 | Caso 18 | 39,90 | 75,06 | Caso 18 | 40,61 | 96,14 |
| Caso 14 | 50,24 | 43,36 | Caso 19 | 41,22 | 78,25 | Caso 19 | 41,27 | 100,22 |
| Caso 17 | 51,07 | 51,32 | Caso 14 | 41,93 | 59,80 | Caso 14 | 43,81 | 76,57 |
| Caso 19 | 51,18 | 56,66 | Caso 17 | 41,93 | 70,84 | Caso 17 | 43,81 | 90,73 |
| Caso 13 | 52,77 | 49,63 | Caso 13 | 48,80 | 68,57 | Caso 13 | 45,61 | 87,70 |
| Caso 16 | 55,81 | 47,56 | Caso 16 | 48,80 | 65,62 | Caso 16 | 50,19 | 83,99 |
| Caso 11 | 67,05 | 47,37 | Caso 11 | 69,23 | 65,44 | Caso 11 | 74,02 | 83,73 |
| Caso 9 | 68,62 | 47,40 | Caso 9 | 72,59 | 65,50 | Caso 9 | 77,65 | 83,79 |